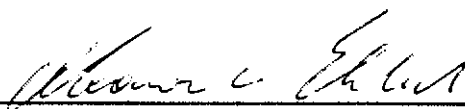


**ENSAIOS DE FILTRAÇÃO EM
SOLOS COM GEOTÊXTEIS**

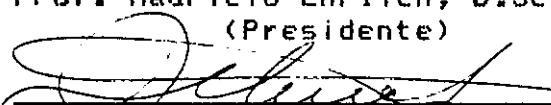
Jorge Luís Goudene Spada

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS
EM ENGENHARIA CIVIL.

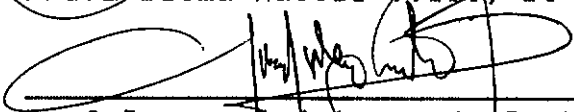
Aprovada por:



Prof. Maurício Ehrlich, D.Sc.
(Presidente)



Profª Delma Mattos Vidal, D.



Prof. Gerson Rodrigues de Castro, M.Sc.



Prof. Willy Alvarenga Lacerda, Ph.D.

**RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
ABRIL 1991**

SPADA, JORGE LUÍS GOUDENE

Ensaio de filtração em solos com geotêxteis
(Rio de Janeiro) 1991.

XII, 168 p. 29,7cm (COPPE/UFRJ, M.Sc. Engenharia
Civil, 1991)

Tese-Universidade Federal do Rio de Janeiro,
COPPE.

1. Ensaio de Filtração com Geotêxteis

I.COPPE/UFRJ II.Título (série)

Aos meus queridos filhos Leticia,
Cláudio e Marieta

AGRADECIMENTOS

Quero externar o meu sentimento de orgulho por ter integrado por um período a área de Mecânica dos Solos da Coppe, tendo sido um tempo muito fértil em minha vida. Agradeço por esta experiência a todos os seus membros e de forma geral à COPPE. Trata-se de uma instituição pública que tem conseguido cumprir a sua função, mesmo diante do quadro de dificuldades que reina entre nós.

Aos professores Márcio Almeida e Maurício Ehrlich à atenção que tiveram comigo e à orientação ministrada neste trabalho de tese.

Aos professores Ian Martins, Fernando Danziger e Francisco Casanova pelo apoio e ensinamentos prestados durante esta empreitada.

À professora Delma Vidal do ITA pelas publicações colocadas à disposição e sugestões oferecidas.

Ao professor Gerson de Castro da USP ao apoio, sugestões e estímulo durante a realização deste trabalho.

Ao professor Roberto Soraggi do IM-UFRJ pelos ensinamentos transmitidos no campo da matemática.

À bióloga Maria Cristina Paixão do Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente da EE-UFRJ pelas análises biológicas realizadas.

Ao Eng^o Flávio Montez da Rhodia S.A. pela sua solicitude no envio das publicações necessárias ao estudo.

À minha colega Maria de Fátima Vasconcelos e ao estagiário André Lacerda pela prestimosa ajuda no campo da computação.

Ao pessoal do laboratório de Geotecnia da COPPE com quem convivi durante a realização do trabalho experimental. Especialmente: ao Sérgio Iório pela colaboração no projeto e desenvolvimento do equipamento de filtração, assim como pela paciência e ajuda durante a realização dos ensaios; ao Álvaro Dellê Viana e ao Marcus Pereira Antunes que me acolheram na sala que ocupam, quando da minha passagem pelo laboratório; à Fátima Seabra Cavalcanti e ao Marcus Pereira Antunes pela realização dos ensaios de caracterização e compactação respectivamente; e à química Maria da Glória Marcondes Rodrigues pela ajuda prestada na monitoração da qualidade d'água do ensaio.

Aos colegas da RFFSA que direta ou indiretamente se envolveram com a concretização deste tema de tese. Especialmente: ao Engº Aron Davidovitsch pelo seu apoio no início desta trajetória; ao Engº Aprígio Costa e ao Téc. Lima pela coleta de amostra de solo na Ligação Ferroviária Celso Bueno-Araguari; ao Geol. José Luís Martins pela coleta de amostra de solo na Ligação Ferroviária Cianorte-Maringá, bem como, pela classificação geológica do solo amostrado; ao Téc. Jorge C. Silva pela sua ajuda na montagem do equipamento e participação na realização dos primeiros ensaios; ao Geom. Ulisses de Oliveira pela fotos de detalhe do permeâmetro e dos geotêxteis empregados; ao Sílvio F. do Amaral pela sua participação na elaboração dos desenhos; a Sandra Maria do Amaral e Márcia Gabrielli pelo capricho e esmero na edição do texto.

Ao meu colega Luiz Francisco Muniz da Silva pelo seu companheirismo ao longo desta caminhada.

A meus pais pelo que me proporcionaram até aqui.

E finalmente à minha esposa, Analice de Almeida Bastos, pela sua generosidade na concessão de condições que criaram um clima favorável para evolução deste trabalho. Ainda agradeço a ela pela realização da maior parte dos desenhos.

Resumo da tese apresentada à COPPE-UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

ENSAIOS DE FILTRAÇÃO EM SOLOS COM GEOTÊXTEIS

Jorge Luís Goudene Spada

ABRIL, 1991

Orientadores: Prof. Márcio de Souza Soares de Almeida

Programa: Engenharia Civil

O presente trabalho é um estudo do comportamento do geotêxtil como elemento filtrante. Inicialmente são apresentados os parâmetros utilizados para descrever as características dos geotêxteis, os fenômenos envolvidos na interação solo-geotêxtil e os critérios mais consagrados para a seleção de filtros geotêxteis.

Com apoio em pesquisas anteriores desenvolveu-se um equipamento de filtração para ensaios em laboratório, baseado na metodologia do "Gradient Ratio", proposta por CALHOUN (1972). Este equipamento foi empregado para a execução de 18 ensaios de filtração de longa duração. Foram testadas dez combinações solo-geotêxtil. Para fazer comparações com os filtros geotêxteis, também, foram ensaiados um papel filtro e um filtro natural.

Os resultados obtidos indicaram bom desempenho dos geotêxteis. A comparação dos resultados de ensaios com os critérios, já mencionados, de seleção de filtros de geotêxteis revelou que os mesmos, no caso em questão, foram conservativos. Verificaram-se que cuidados especiais devem ser tomados para evitar o surgimento de sedimentos ferrugínicos na água em ensaios de filtração de longa duração.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirement for the degree of Master of Science (M.Sc.)

SOILS FILTRATION TESTS WITH GEOTEXTILE

Jorge Luís Goudene Spada

Abril 1991

Thesis Supervisor: Prof. Marcio de Souza Soares de Almeida

Department: Civil Engineering

The present work is a study of geotextile filter behaviour. Initially, it presents the usual parameters to describe the geotextiles characteristics, the involved phenomena in the geotextile-soil interaction and the more accepted criteria for geotextile filter selection.

Supported by previous researches, a filtration apparatus was developed for laboratory tests, based on the Gradient Ratio methodology, proposed by CALHOUN (1972). This apparatus was employed to perform eighteen long term filtration tests, during which ten different combinations of geotextile-soil were tested. In order to be compared with geotextile filters, it was also tested a paper filter and a natural filter.

The results of the tests showed that geotextile performed well. The comparison of tests results with the above mentioned criteria indicated that such criteria were conservative in this study. It was verified that special care should be taken to avoid the appearance of ferruginous sediments in the water during long term filtration tests.

ÍNDICE

	pág.
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO.....	01
I.1 - Relevância do Estudo	01
I.2 - Objetivo e Estrutura da Tese	02
 CAPÍTULO II - PRINCÍPIOS DA FILTRAÇÃO COM GEOTÊX-	
TEIS	03
II.1 - Introdução	03
II.2 - Breve Histórico	03
II.3 - O Geotêxtil	05
II.3.1 - Polímeros Utilizados	05
II.3.2 - Estrutura do Geotêxtil	06
II.3.3 - Durabilidade	11
II.4 - Filtração com Geotêxtil	13
II.4.1 - Geotêxtil em Contato com o Solo	14
II.4.2 - Outras Formas de Filtração com Geotêxtil	17
II.5 - Geotêxtil e Água	17
II.5.1 - Filtração	18
II.5.2 - Permeabilidade	24
II.5.3 - Aptidão à Embebição	26
II.6 - Solo, Geotêxtil e Água	27
II.6.1 - Erosão Interna do Solo ("piping").....	27
II.6.2 - Colmatção	30
II.7 - Critérios de Projeto	33
II.7.1 - Filtro Granular Convencional ...	33
II.7.2 - Geotêxtil	41
II.8 - Comentários	50
 CAPÍTULO III - EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO PARA EN-	
SAIOS DE FILTRAÇÃO	52
III.1 - Introdução	52
III.2 - Pesquisas Anteriores	52
III.3 - Equipamento Desenvolvido para os Ensaio de Filtração.....	68
III.3.1 - Permeâmetro	69
III.3.2 - Equipamento de Filtração	76
III.4 - Comentários	79
 CAPÍTULO IV - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESUL-	
TADOS	81
IV.1 - Introdução	81
IV.2 - Programa de Ensaio	81
IV.2.1 - Programa 1	81
IV.2.2 - Programa 2	83
IV.2.3 - Programa 3	84
IV.3 - Descrição dos Materiais Ensaioados	85
IV.3.1 - Filtros	85
IV.3.2 - Solos	86

IV.4 - Procedimentos de Ensaio	94
IV.4.1 - Água	94
IV.4.2 - Filtros	96
IV.4.3 - Solos Protegidos	98
IV.4.4 - Equipamento	100
IV.5 - Apresentação e Discussão dos Resultados	104
IV.5.1 - Programa 1	105
IV.5.1.1 - Eventos Registrados	105
IV.5.1.2 - Apresentação dos Resultados	108
IV.5.1.3 - Discussão dos Resultados	116
IV.5.2 - Programa 2	122
IV.5.2.1 - Eventos Registrados	122
IV.5.2.2 - Apresentação dos Resultados	123
IV.5.2.3 - Discussão dos Resultados	125
IV.5.3 - Programa 3	128
IV.5.3.1 - Eventos Registrados	129
IV.5.3.2 - Apresentação dos Resultados	131
IV.5.3.3 - Discussão dos Resultados	149
IV.6 - Comentários	155

CAPÍTULO V - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....158

V.1 - Introdução	158
V.2 - Conclusões da Pesquisa	158
V.3 - Sugestões para Trabalhos Futuros	160

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS162

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

I.1 - RELEVÂNCIA DO ESTUDO

O geotêxtil como filtro tem sido a opção mais frequentemente adotada, entre nós, em obras de drenagem profunda de ferrovia ou rodovia. São exemplos do uso de geotêxteis: obras de drenos longitudinais ao nível da plataforma, obras de drenos em fundos de talvegue para controlar subpressões nas fundações de aterros a meia-encosta e valas drenantes para limitar a ascensão do lençol freático em níveis aceitáveis para estabilidade dos maciços íngremes adjacentes ao leito estradal. Esta preferência pelos geotêxteis acontece porque os drenos naturais, tradicionalmente usados, obrigam a realização de sucessivas transições granulométricas que trazem dificuldades de ordem executiva. Por outro lado, a inexistência ou escassez de materiais naturais junto a obra é muitas vezes um fato, o que acaba por onerar o serviço com elevadas distâncias de transporte para a importação do material de regiões mais afastadas. Aliam-se às razões já expostas, o sucesso que a técnica obteve ao longo desses anos num elevado número de obras.

Apesar do uso intensivo do geotêxtil no Brasil, pode-se observar ao correr desses anos uma quase ausência da adoção de critérios de projeto para escolha e definição de um tipo de geotêxtil a ser utilizado numa obra de drenagem. Dentro deste contexto, é natural que a realização de ensaios de filtração para os fins descritos ainda seja uma

prática limitada a umas poucas iniciativas no âmbito da pesquisa.

I.2 - OBJETIVO E ESTRUTURA DA TESE

O objetivo deste trabalho foi o estudo do comportamento de geotêxteis como elemento filtrante, marcadamente nos seguintes aspectos: capacidade de retenção de partículas; e colmatção física do geotêxtil. Para isso, foram promovidos ensaios de filtração de longa duração em amostras permanentemente submersas de solos com diferentes tipos de geotêxteis em laboratório. Os solos escolhidos para o estudo são solos naturais comumente envolvidos nos projetos de drenagem subsuperficial, quais sejam: areias limpas, solos provenientes do arenito caiuá e solos da unidade cenozóica. Os estudos ligados aos dois últimos solos foram particularmente interessantes visto tratarem-se de solos de elevada erodibilidade.

A apresentação da tese foi estruturada em cinco capítulos. Inicialmente, discutem-se os fundamentos da filtração com geotêxteis (cap.II). No capítulo III, abordam-se pesquisas anteriores sobre ensaios de filtração e apresenta-se o equipamento especialmente desenvolvido, utilizado nos ensaios desta tese. A apresentação e discussão dos ensaios realizados são feitas no capítulo IV. No quinto e último capítulo reúnem-se as conclusões do estudo e sugestões para pesquisas futuras.

CAPÍTULO II

PRINCÍPIOS DA FILTRAÇÃO COM GEOTÊXTIL

II.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo foram reunidos os conhecimentos básicos para o entendimento do geotêxtil, como elemento de filtro. Faz-se inicialmente um breve histórico sobre o geotêxtil e o seu uso na filtração. A seguir, enfoca-se sucessivamente o geotêxtil isoladamente, o geotêxtil e a água, e por fim, o solo, o geotêxtil e a água.

II.2 - BREVE HISTÓRICO

Segundo BYRNE (1989), durante a 2a. Guerra Mundial, a borracha sintética obtida a partir do petróleo, mostrou-se uma alternativa atraente em relação à borracha natural, que era uma matéria-prima importada nos países do primeiro mundo. A partir disto, foi aberta mais uma possibilidade de uso de um produto oriundo do petróleo. A borracha sintética passou a estar disponível para que novas necessidades encontrassem nela a aplicação desejada.

"Os geotêxteis foram desenvolvidos pela primeira vez na Holanda" (VAN ZANTEN, 1986). Isto sucedeu-se com a implantação de um plano para fechamento de braços de mar, conhecido como Projeto Delta, após as catastróficas enchentes de fevereiro de 1953. Este projeto, de dimensões gigantescas, obrigou a busca de novos materiais e sistemas de construção revolucionários. A indústria holandesa foi cha-

mada e produziu uma manta tecida manualmente, obtida a partir de tiras estrudadas de Nylon 6. Este material foi empregado para formar grandes sacos de areia utilizados contra a ação erosiva do mar.

De acordo com INGOLD e MILLER (1988), os modernos geotêxteis surgiram ao final dos anos 60, frutos de uma ofensiva das indústrias têxteis, que buscavam novos mercados, e encontraram na construção civil um enorme potencial de consumo principalmente nas rodovias e ferrovias. Durante a fase de abertura do mercado, os fabricantes investiram pesadamente em promoção e pesquisa, praticando uma política de venda agressiva. Em virtude disso, a indústria, em parte, foi penalizada pois o mercado mostrou-se cético a esse comercialismo. No entanto, parece pouco provável que os geotêxteis alcançassem o desenvolvimento a que chegaram sem que houvesse o impulso descrito, suportado por pesquisas.

Ainda segundo INGOLD e MILLER (1988), a grande reviravolta na tecnologia dos geotêxteis aconteceu em 1977 na 1a. Conferência Internacional sobre Geotêxteis, na cidade de Paris. Dando sequência à este primeiro encontro já foram realizados mais três, Las Vegas (1982), Viena (1986) e Haia (1990). Somando-se à estes esforços em 1983 foi criada a Associação Internacional de Geotêxteis (IGS) que congrega a nível internacional vários comitês e associações nacionais.

Sendo o geotêxtil um produto internacional, tem sido uma preocupação comum dos fabricantes e usuários, nos últimos anos, a unificação dos ensaios e das definições, o que vem estimulando uma ação de normalização, fazendo com que existam hoje várias normas nacionais editadas ou em desenvolvimento. Este trabalho de padronização a nível inter-

nacional tem sido realizado pela International Organisation for Standardization (ISO), a qual já editou várias normas sobre geotêxteis. Dentro desta linha, podemos dizer que o Brasil já participa oficialmente desse esforço desde dezembro de 1989, quando foi instalada a Comissão de Estudo de Geotêxteis ligada ao Comitê Brasileiro de Construção Civil da ABNT.

As primeiras utilizações de geotêxtil em obras hidráulicas remontam na Europa a 1968 e no Brasil a 1973, segundo RHODIA S.A. (1978). Esta fase inicial dos geotêxteis é considerada por GOURC e FAURE (1990) como um avanço da técnica sobre a pesquisa, já que segundo os mesmos: "os pesquisadores em parte mostraram-se perplexos com o sucesso da técnica, sendo incapazes de oferecer uma explicação completa do comportamento satisfatório do sistema solo-geotêxtil "in situ". A razão para isso era o uso de um produto sintético como um material intermediário entre o terreno e o meio drenante, o que era uma mini-revolução com respeito às partículas constituintes do solo". Seguindo-se a isso os mesmos autores afirmam "hoje, contudo, a interação entre o solo e fibra está começando a ser entendida e controlada, tendo em vista que os efeitos hidráulicos de um geotêxtil podem ser quantitativamente avaliados".

II.3 - O GEOTÊXTIL

II.3.1 - POLÍMEROS UTILIZADOS

Os geotêxteis são mantas permeáveis, flexíveis e finas produzidas a partir de fibras sintéticas. O material

constituente das mesmas é uma substância denominada polímero, sendo que o produto final compõe-se de um polímero básico mais pequenas quantidades de aditivos. Estes aditivos são usados para melhorar as propriedades do produto final ou facilitar operações de transformação, podendo exercer os papéis de lubrificantes, estabilizantes e plastificantes (ROCHA, 1983).

Os polímeros abrangem três principais grupos: termoplásticos, termofixos e elastômeros. Dentre estes, o termoplástico é o que reúne características adequadas ao processo de fabricação do geotêxtil, uma vez que é capaz de sofrer amolecimento e endurecimento sob a ação do calor ou resfriamento, respectivamente. O polímero termoplástico é fornecido pela indústria petroquímica na forma granular ou em pó.

Os polímeros termoplásticos mais usados são, na ordem em que foram sendo descobertos: polietileno, poliamida (Nylon), poliéster (Terylene) e polipropileno. O polietileno e o polipropileno são chamados também de poliolefinas pelas suas características muito similares. Os polímeros de maior consumo na indústria do geotêxtil são o poliéster e as poliolefinas. Algumas propriedades gerais dos polímeros são mostradas na figura II.1.

II.3.2 - ESTRUTURA DO GEOTÊXTEL

As propriedades dos geotêxteis estão diretamente ligadas não só à natureza do polímero, mas também ao modo como as fibras são combinadas entre si, o que acaba por determinar o tipo de estrutura existente. A estrutura é

PROPRIEDADES		RESISTÊNCIA				
		MÓDULO DE ELASTICIDADE				
		DEFORMAÇÃO NA RUPTURA				
		DEFORMAÇÃO LENTA				
		PESO ESPECÍFICO				
		CUSTO				
POLÍMEROS			POLIESTER	POLIAMIDA	POLIPROPILENO	POLIETILENO
RESISTÊNCIA PARA:	RAIO U.V.	ESTABILIZADO				
		NÃO ESTABILIZADO				
	ÂLCALIS					
	FUNGUS, VERMES, INSETOS					
	COMBUSTÍVEL					
	DETERGENTE					

LEGENDA:

● ALTA

○ MÉDIA

● BAIXA

Figura II.1 Quadro Comparativo de Propriedades Gerais dos Polímeros
(JOHN, 1987)

imposta pela técnica adotada na confecção do produto. Assim os geotêxteis são classificados quanto a estrutura em tecidos, não tecidos e tricotados.

Os tecidos, como o nome indica, usam o processo tradicional de tecelagem, onde se recorrem aos teares mecânicos. Através destes, obtêm-se dois conjuntos de fios entrelaçados, em ângulo de 90° . As fibras alinhadas na direção do processo de fabricação são denominadas urdidura ou urdume e as fibras dispostas transversalmente à direção do rolo são identificadas como trama. Os padrões de entrelaçamentos apresentam-se de forma variada e têm origem na indústria têxtil. O tecido mais simples é o semelhante a uma peneira, isto é, uma malha com uma certa abertura entre as fibras e com um único tipo de fio, figura II.2. Hoje, o tipo de tecido mais utilizado é composto por laminetes cuja complexidade é maior do que a do anterior. Os espaços entre os laminetes não são vistos, quando se olha na direção perpendicular ao plano da manta, e os seus tamanhos são difíceis de estimar, figura II.3 (GOURC e FAURE, 1990). Os tecidos com laminete recomendados para a filtração exibem espaços visíveis, criados pelo afastamento das fibras, que facilitam a passagem d'água. Pode-se dizer que os tecidos, em geral, mostram aberturas específicas, o que os capacita para uma filtração mais seletiva.

Os não tecidos são obtidos pela deposição de fibras, monofilamentos contínuos ou cortados, em forma curva. Nomeia-se este processo de "spunbonded". As fibras são lançadas aleatoriamente sobre uma esteira rolante, ficando a espessura do produto condicionada à velocidade de avanço da esteira. A seguir, o material passa para outra esteira onde

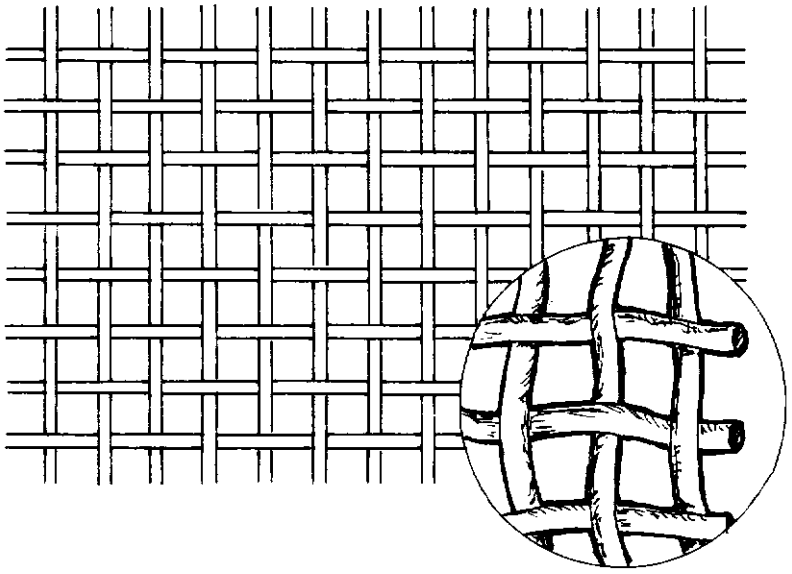
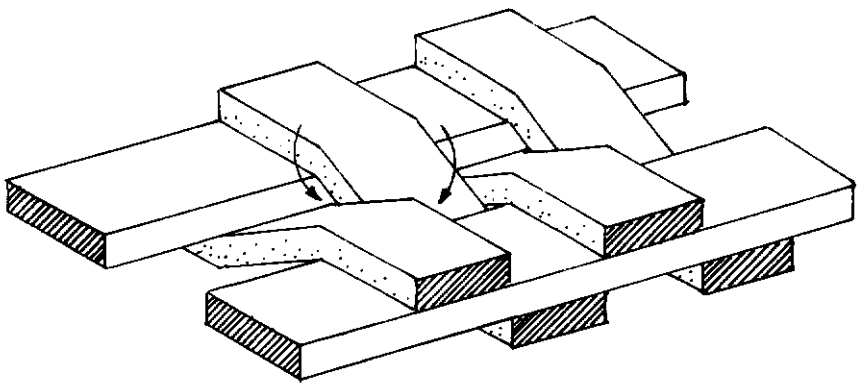
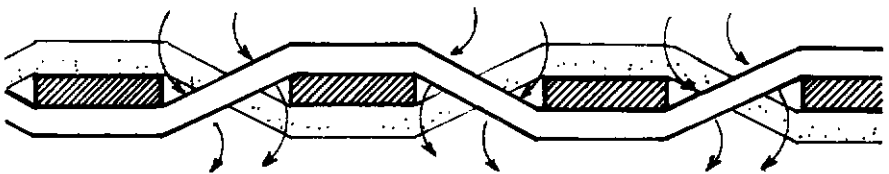


Figura II.2 Tecido de Monofilamento



PERSPECTIVA



SEÇÃO ESQUEMÁTICA

Figura II.3 Tecido de Laminetes
(GOURC e FAURE , 1990)

sofre um tratamento de ligação das fibras, que pode ser:

- . mecânico - conhecido como agulhagem que se traduz numa ação repetida de penetração em toda a profundidade do material de milhares de agulhas com pontas curvas. Durante esta operação algumas quebras de filamentos contínuos podem acontecer. Visa-se obter um maior entrelaçamento das fibras. Por fim, a manta apresenta uma espessura de 2 a 5 mm;
- . térmico - fornece coesão ao conjunto pela fusão dos filamentos nos seus pontos de contato. O material assim produzido tende a ser relativamente fino com espessura típica de 0,5 a 1,0 mm;
- . químico - que usualmente sucede a agulhagem, fornece uma ligação adicional ao emaranhado de fios pela aplicação de acrílico, o ligante mais comumente adotado, na forma de imersão, molhagem ou aspersão. Imediatamente processa-se a cura, que ocorre ao longo de um forno linear ou pela ação de um rolo quente. Este tratamento é o menos utilizado.

Os não tecidos caracterizam-se por um maior grau de complexidade estrutural do que os tecidos. Quando usados como filtro, não atuam como uma simples interface mas sim como um meio tridimensional, já que a espessura passa a ser um parâmetro adicional (GOURC e FAURE, 1990).

A seleção de um não tecido fino efetua-se para a situação em que uma alta permeabilidade é desejável, e a escolha de um não tecido grosso dirige-se para o caso em que a função principal é a retenção do solo (VAN ZANTEN,

1986).

Para concluir-se a abordagem dos geotêxteis quanto a sua classificação de acordo com a estrutura, enfocar-se-á o geotêxtil tricotado. A primeira impressão que estes causam é que não têm aplicação como geotêxtil, pois tendem a sofrer excessivo alongamento sob tensão. No entanto, pode-se recorrer à técnica da tecelagem na urdidura para alcançar uma alta resistência unidirecional. Consiste em aplicar feixes de multifilamentos de alta resistência sobre uma base tricotada deformável, que desempenha o papel de um substrato. O produto final é um material que mostra uma alta resistência e um baixo alongamento na direção longitudinal (urdidura). O material descrito na realidade é uma associação das técnicas de tricotagem com a de tecelagem e pode-se classificá-lo como um geotêxtil tricotado-tecido. E assim tem caminhado a produção dos tricotados, a maioria deles sendo o resultado da conjunção com outros métodos de fabricação dos geotêxteis.

II.3.3 - DURABILIDADE

A durabilidade pode ser definida como a capacidade que o produto possui de guardar ao longo do tempo o nível de integridade desejado, dentro da idéia que o geotêxtil escolhido foi o adequado às solicitações resultantes do manuseio e da instalação. Uma vez em uso, o geotêxtil está sujeito essencialmente a dois tipos de ataques: o mecânico e o químico.

O ataque mecânico pode advir de uma ação abrasiva, que não se verifica para um geotêxtil enterrado, numa si-

tuação normal de projeto, mas pode ocorrer na medida em que o geotêxtil é empregado sobre o terreno, fazendo parte de um enrocamento, por exemplo. Outra forma de ataque mecânico é a ação de animais e insetos que vivem sob o nível do terreno.

A possibilidade de ataque químico está presente quando o geotêxtil está junto a solos muito ácidos ou muito básicos, em lagos de rejeito onde substâncias agressivas possam atingir o geotêxtil. As alterações químicas vão se traduzir em inchamento das fibras, perda do material do polímero ou dos aditivos que resulta em prejuízo para a estrutura e acaba por determinar uma fragilização do produto. Porém, sabe-se que a maioria dos polímeros têm uma resistência excelente ao ataque químico, a menos de algumas exceções, como o poliéster que pode ser atacado por álcalis forte, a poliamida que pode vir a sofrer ação de hidrólise, e do polipropileno que pode oxidar-se.

O ataque biológico não deixa de ser um ataque químico, porque os microorganismos ao extraírem pequenos segmentos de moléculas do polímero necessárias ao seu metabolismo, estão realizando um ataque químico. O poliéster e as poliolefinas apresentam boa resistência biológica enquanto a poliamida é levemente atacado por fungos e bactérias. Já foi observado que fungos aderidos ao geotêxtil realizaram ataques a alguns tipos de revestimentos aplicados sobre as fibras do material, sem atacar as fibras (ROLLIN e LOMBARD, 1990). No mesmo trabalho, estes autores afirmam que felizmente os revestimentos dos geotêxteis têm sido selecionados para resistir a um ataque microbiológico.

INGOLD e MILLER (1988) chamam a atenção de que os

quadros usualmente publicados sobre a resistência ou fraqueza aos vários agentes referem-se aos polímeros. No entanto, a resistência do polímero a um determinado ataque pode ser melhorada pela ação de aditivos incorporados ou, em alguns casos, pelo processo de fabricação. Lembram ainda os mesmos autores, que não foi suficientemente entendida a reação do geotêxtil à complexidade do meio ambiente, já que um determinado geotêxtil pode, por exemplo, numa situação específica resistir a dois ataques isoladamente, e não a uma ação conjunta dos dois.

II.4 - FILTRAÇÃO COM GEOTÊXTIL

Um solo granular, usado como filtro em drenos para proteger solos do carreamento de partículas, exerce duas funções básicas: a de dreno e a de filtro propriamente dito. Como dreno deve permitir a passagem livre do fluxo de água de um lado para outro do filtro, e como filtro, propriamente dito, não deve permitir uma perda significativa de partículas ao longo do tempo. Papel semelhante desempenha um geotêxtil que venha a substituir uma ou mais camadas granulares num dispositivo de drenagem convencional. As aberturas do geotêxtil precisam ser pequenas o bastante para realizar a retenção das partículas do solo protegido, ao mesmo tempo, que o geotêxtil necessita conservar sua permeabilidade mais alta que a do solo protegido para poder cumprir a sua função drenante.

II.4.1 - GEOTÊXTIL EM CONTATO COM O SOLO

A ação de um gradiente hidráulico sob o sistema solo/geotêxtil provoca o fluxo de água que, por sua vez, induz a um rearranjo de partículas, onde são identificados dois mecanismos como sendo responsáveis pela instalação desse fenômeno. O primeiro deles é conhecido como auto-filtração e o segundo como formação de uma rede de arcos.

A auto-filtração acontece quando, em presença de um fluxo unidirecional a atuação do filtro não fica restrita ao geotêxtil, e sim propaga-se para o solo adjacente, onde se forma um filtro natural. O geotêxtil comporta-se como um catalisador. No início do processo ocorre uma inevitável perda de partículas finas do solo através do filtro natural formado no solo e do filtro de geotêxtil sob o efeito do fluxo d'água. Dentro de um fluxo unidirecional o filtro natural aumenta prontamente a partir da manta, criando-se uma zona de partículas maiores em que cada partícula é uma ponte. Estas partículas maiores retidas limitam um pouco as menores que, por sua vez, retêm partículas ainda menores até que não seja possível nenhuma partícula de solo migrar. Forma-se então uma zona com estrutura de filtro graduado no interior do solo, nas proximidades do geotêxtil, figura II.4.

A formação de rede de arcos surgirá frente a um geotêxtil tecido, cujas dimensões de abertura do poro são uniformes, o que acarreta um arqueamento na disposição das partículas de solo como ilustrado na figura II.5. Formação semelhante será estabelecida, mas com uma rede de arcos mais aleatória, com um geotêxtil não tecido fino, usualmen-

te termoligado (JOHN, 1987).

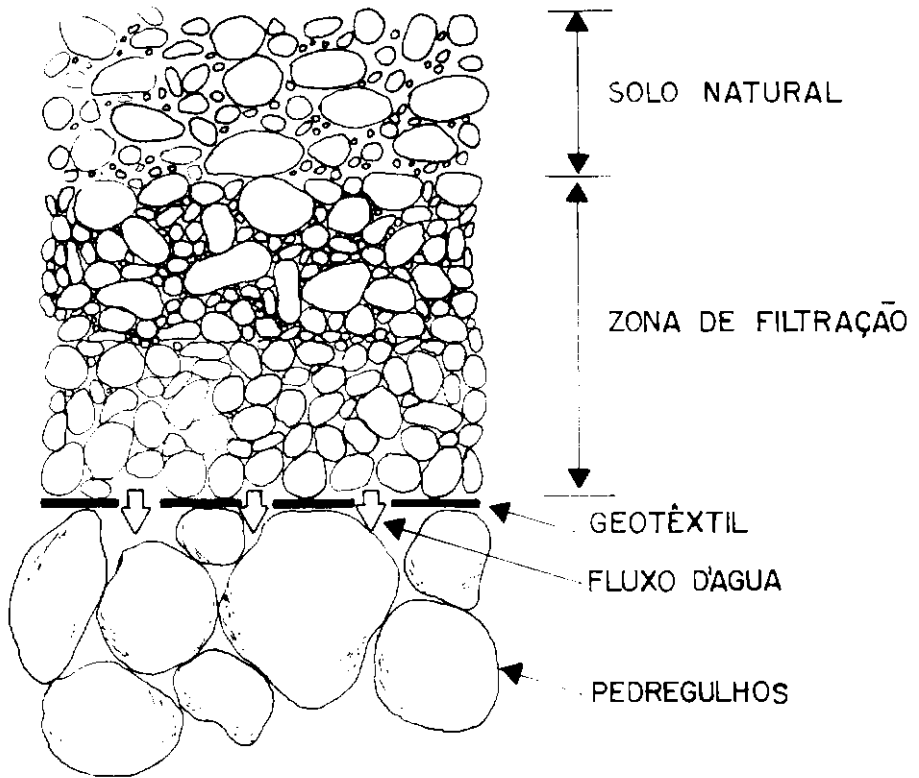


Figura II.4 Filtro Graduado Desenvolvido Dentro do Solo Adjacente ao Geotêxtil
(JOHN, 1987)

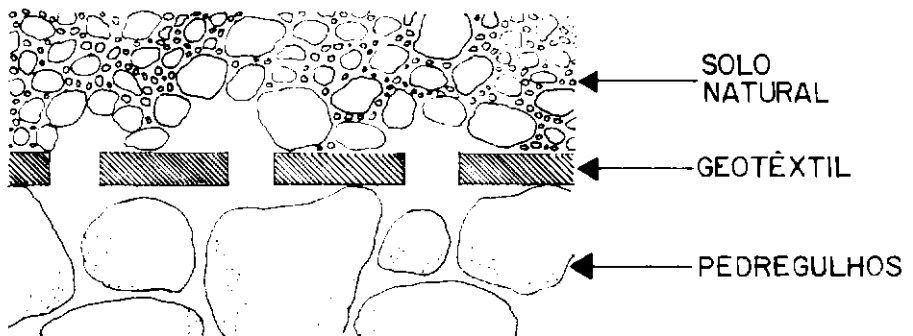


Figura II.5 Arcos de Solo Sobre os Poros do Geotêxtil
(JOHN, 1987)

ROLLIN e LOMBARD (1988) apontam a formação de uma rede de arcos como um produto da seleção de um geotêxtil. Deste modo, esses autores agrupam quatro propriedades do geotêxtil que são capazes de acelerar a formação de arcos, a seguir mostradas:

- baixa permeabilidade, para reduzir as forças de percolação sobre a partícula;
- baixa porosidade, para não permitir carreamento excessivo de partícula;
- uma grande espessura para aumentar a área de molhagem d'água, buscando um decréscimo das forças de percolação sobre as partículas de solo;
- superfície com característica de abundância de fibras livres em contato com o solo.

ROLLIN e LOMBARD (1988) também acreditam que a estabilização da rede de arcos está ligada à ação de forças elétricas e de adsorção, entre o geotêxtil e partículas de solo, bem como, entre partículas por si só. Em região do solo anterior a esta rede, o geotêxtil impedirá a passagem de partículas com diâmetro menor do que sua abertura de filtração.

O desenvolvimento dos mecanismos aqui descritos é confirmado por pesquisa realizada por ELMER em JOHN(1987) sobre filtros ranhurados e de tela onde uma areia bastante uniforme pode arquear sobre uma malha regular de abertura duas ou três vezes maior que o d_{50} do solo. O mesmo pode afirmar-se para o trabalho de ROLLIN e LOMBARD (1988), quando estes mostram uma foto (ampliada 100 vezes) da interface solo-geotêxtil revelando a presença dos arcos.

A condição de fluxo reverso é mais desfavorável

para a formação das condições que estabelecem o mecanismo da auto filtração no solo. Contudo, quando o período em que a água percola num determinado sentido é longo, ainda é possível a constituição de um filtro, se bem que pouco eficiente. Caso o ciclo de reversão do sentido de fluxo seja curto, a chance de que se instale um filtro é bem menor.

II.4.2 - OUTRAS FORMAS DE FILTRAÇÃO COM GEOTÊXTIL

Em muitas obras os geotêxteis têm a função de assegurar que rios, lagos ou sistemas de esgotos sejam preservados da contaminação de partículas de argila, silte e partículas orgânicas em suspensão nos efluentes. A aplicação realiza-se com a instalação de barreiras que interrompem o avanço das partículas, enquanto permitem o líquido percolar através do geotêxtil.

O emprego do geotêxtil no pavimento rodoviário ou ferroviário objetiva a separação de camadas que compõem estas estruturas, sob a ação de carregamento cíclico imposto pela passagem de veículos ou trens. Por exemplo, sobre esta condição o geotêxtil, instalado sob o lastro ferroviário e sobre um solo saturado, impede a ascensão de partículas finas para o lastro.

II.5 - GEOTÊXTIL E ÁGUA

As propriedades hidráulicas do geotêxtil são definidas pela sua capacidade de filtração, sua permeabilidade à água e sua aptidão à embebição. As mesmas são usualmente medidas através de procedimentos padronizados. Todas inter-

ferem sobre a performance do filtro de geotêxtil, sendo cada uma delas descritas separadamente a seguir.

II.5.1 - FILTRAÇÃO

O potencial de filtração de um geotêxtil está ligado à porometria (distribuição dos tamanhos dos poros), à porosidade e ao tamanho do poro.

a) POROMETRIA e POROSIDADE

O conceito de porometria tem significado no caso de um não tecido, tipo feltro. Vários foram os procedimentos desenvolvidos para sua obtenção envolvendo recursos óticos, microscopia eletrônica, métodos estatísticos e técnica de intrusão de mercúrio. Apesar de todos estes esforços, nenhum deles logrou a obtenção de um procedimento simples e confiável. Somente recentemente PRAPAHARAN e outros (1989) chegaram a uma sistemática para a determinação da distribuição dos poros, que se mostra rápida e repetitiva. A técnica implica em uso de equipamento simples de laboratório e está galgada na intrusão de mercúrio.

Calhoun em 1972, buscando quantificar a área de furos de um tecido, definiu a percentagem de área aberta como sendo:

$$PAA = \frac{\text{total da área individual das aberturas}}{\text{total da área do material}} \quad (II.1)$$

As áreas acima são obtidas pela imagem projetada numa tela de uma amostra de material. Observa-se que a PAA não tem significado para os não tecidos, já que os mesmos

não apresentam aberturas com limites específicos, com exceção das produzidas pela agulhagem. Os tecidos com laminetes apresentam valores de área aberta menores que 0,1% enquanto que os tecidos de monofilamentos superam os 30%.

A porosidade tem por base o mesmo princípio utilizado nos solos, em que:

$$n_{\text{material}} = \frac{V - V_u}{V} \quad (\text{II.2})$$

Onde V_u = volume dos sólidos = $\frac{\text{peso}}{\text{peso específico do polímero}}$

b) TAMANHO DO PORO

Em virtude da dificuldade encontrada para determinação da porometria, a definição de uma abertura de filtração para o geotêxtil foi a saída encontrada.

A escolha do ensaio adequado para medir o tamanho da abertura de filtração ("filtration opening size", FOS) ou simplesmente abertura de filtração ("filtration opening", Of) tem gerado muito debate no meio técnico. As três principais metodologias de laboratório empregadas são:

- peneiramento a seco - conhecida em inglês como "Apparent Opening Size (AOS)", método da ASTM, fornece O_{95} ;
- peneiramento úmido - desenvolvido no Instituto Franzius de Hannover, fornece D_w ;
- peneiramento hidrodinâmico - método do Comitê Francês de Geotêxteis e Geomembranas (CFGG), fornece D_{95} .

O AOS (inicialmente denominado "Equivalent Opening Size, EOS) fornece uma medida da maior abertura efetiva

do Geotêxtil. A sua determinação realiza-se com o peneiramento de contas de vidro de mesmo diâmetro sobre o geotêxtil durante um período de tempo de dez minutos. Inicia-se por um tamanho de conta ("bead") que passe mais de 5% em peso, até que, por sucessivos peneiramento com diâmetros cada vez maiores, somente 5% ou menos passe através do material. O AOS é definido como um tamanho retido de conta expresso pela maior peneira do par de peneiras usado para definir o tamanho da conta. Equivale também dizer, por exemplo, que as contas de tamanho nº 40 são as que passam na peneira nº 35 mas ficam retidas na de nº 40. As peneiras mencionadas são do padrão americano.

O AOS, em termos do tamanho da abertura efetiva do material, representa um tamanho de abertura para o qual 95% dos poros do material são menores do que aquele diâmetro. De tal forma que o AOS pode ser entendido como um O_{95} , onde 95% de um diâmetro de contas teve sua passagem impedida pelo geotêxtil.

O ensaio do AOS foi desenvolvido por Calhoun (1972), quando era conhecido por EOS e utilizava areia de grãos arredondados. O U.S. Corps of Engineers mais adiante introduziu as contas de vidro, encontradas comercialmente em diâmetros uniformes.

Muitas vezes as contas permanecem retidas dentro do material durante o peneiramento, não chegando a atravessar o geotêxtil. Outra situação que se verifica é as contas permanecerem grudadas ao material devido à geração de eletricidade estática entre as contas e as fibras durante o peneiramento a seco. A fim de controlar este problema, pode recorrer-se a dispositivos antiestáticos (CHRISTOPHER e

HOLTZ, 1985). Segundo Gielly e Schaal (1990), torna-se difícil a obtenção de valores de O_r menores do que 80 micras em consequência da atração eletroestática, já mencionada. Também observou-se que a presença de um filme superficial sobre certos geotêxteis dificulta a travessia das contas pelo material, o que acaba por mascarar o resultado. Um recurso que se mostrou efetivo na solução deste problema para muitos geotêxteis foi a imersão em água a fim de promover a remoção dessa cobertura seguida de secagem do material antes de iniciar o ensaio (Carroll, 1985).

No peneiramento úmido (D_w) do Instituto Franzius de Hannover, uma quantidade de areia de quartzo com distribuição granulométrica conhecida é peneirada sobre um geotêxtil, sob chuveiramento de água contínuo, dentro de um equipamento adaptado para este fim. Durante a realização do ensaio, que dura 15 minutos, a areia que atravessa o material é coada num filtro de papel. A seguir, obtém-se sua distribuição granulométrica a partir de peneiras de malhas de diâmetro 45 a 2500 micras. A determinação do tamanho da abertura efetiva do geotêxtil, D_w , efetua-se através de uma relação entre a fração mais grosseira que passou pelo material e a fração retida que ainda se apresenta em quantidade expressiva com relação a fração original. Observam-se que, grandes diferenças relativas em valores de D_w são possíveis (VAN ZANTEN, 1986).

O peneiramento hidrodinâmico (D_{98}), desenvolvido na França, emprega um equipamento projetado especificamente para este objetivo, que se constitui de quatro cestos basculáveis de bases vazadas atrelados a uma roda móvel, em cuja base é posicionado um reservatório de água. Uma amostra de

geotêxtil é posicionada no fundo de cada cesto com uma quantidade de areia por cima. A areia utilizada é selecionada de forma a atender requisitos específicos. A roda em movimento submerge alternadamente os cestos, de tal forma, que o geotêxtil fica coberto por uma lâmina d'água de 10 cm. As imersões sucessivas dos cestos duram 24 horas. Parte da areia que passa pelo geotêxtil é amostrada para ser submetida a ensaio de peneiramento. O D_{95} da curva de distribuição granulométrica obtida é designado como tamanho da abertura de filtração do geotêxtil. Este ensaio já é realizado no Brasil (Chammas, 1988).

Devido às diferenças das metodologias de investigação empregadas nos três processos, anteriormente descritos, diferentes valores de abertura de filtração (O_f) são obtidos, como mostrado nas figuras II.6 e II.7. Estes processos não consideram que as partículas neles utilizadas possam ficar emaranhadas dentro da estrutura fibrosa (GOURC e FAURE, 1990).

Um trabalho em andamento na "International Organisation for Standardization" (ISO), mostrou uma dispersão significativa quando se comparam valores de abertura de filtração de um geotêxtil específico ensaiado segundo o mesmo método por vários centros de pesquisa, mostrando que existe muito trabalho a fazer para diminuir a variação dos resultados dessa propriedade do geotêxtil (GOURC e FAURE, 1990).

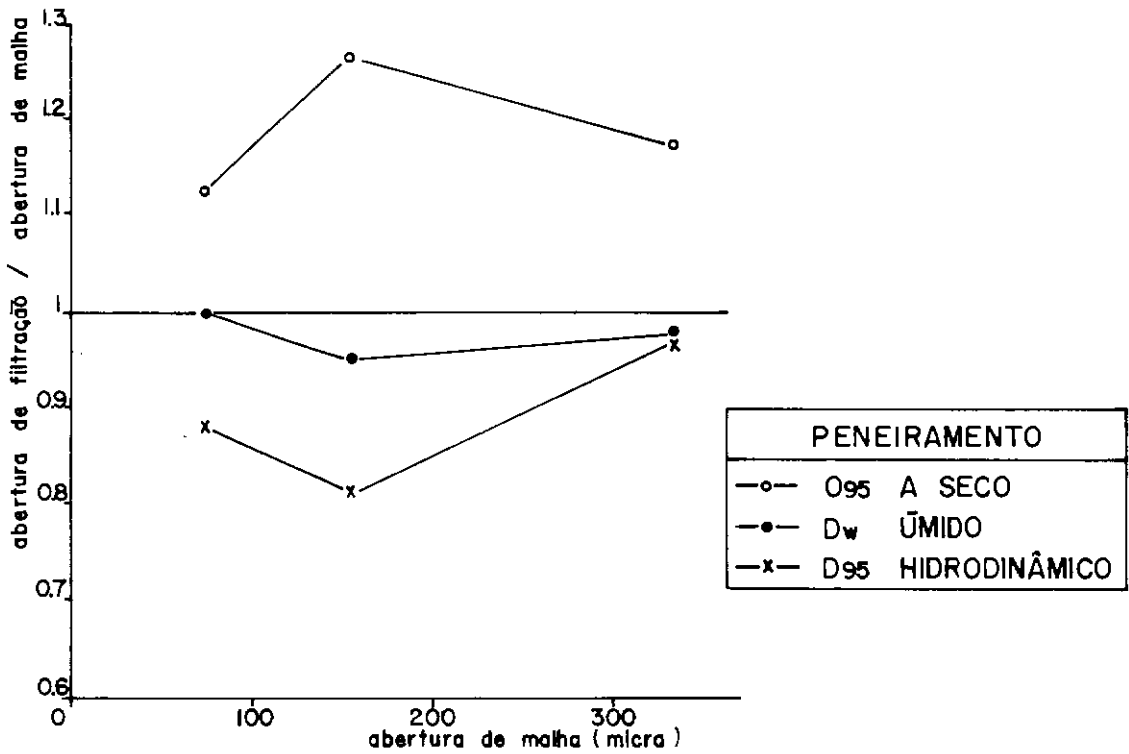


Figura II.6 Avaliação da Abertura de Filtração de um Geotêxtil Tecido de Monofilamento
(GOURC e FAURE, 1990)

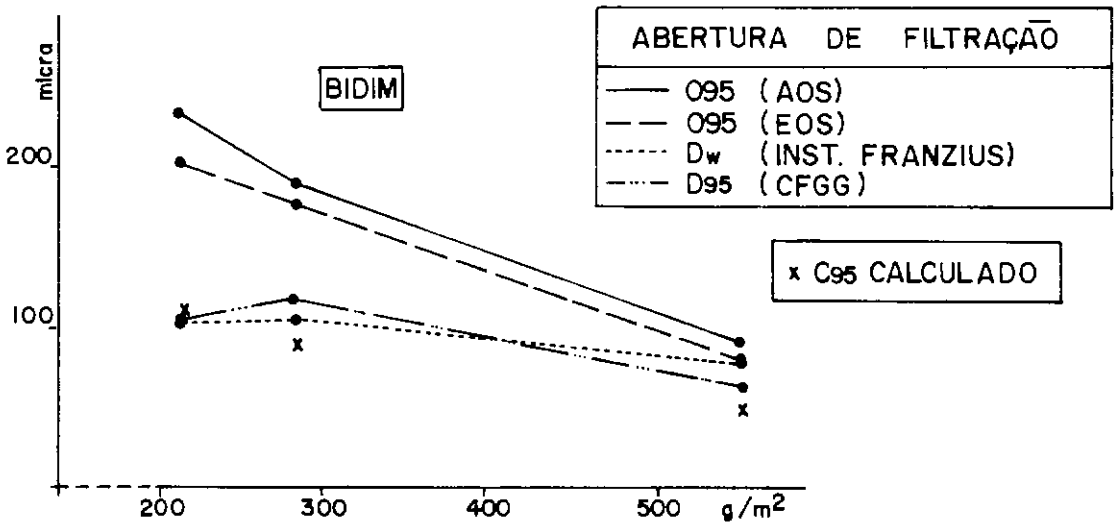


Figura II.7 Variação do Tamanho da Abertura de Filtração em Função do Método e Massa do Geotêxtil por m²
(GOURC e FAURE, 1990)

II.5.2 - PERMEABILIDADE

Segundo CARROLL (1985) a indústria de geotêxteis utilizou os mesmos conceitos de fluxo através de um meio poroso para expressar a permeabilidade do geotêxtil. Assim sendo, utiliza-se um permeâmetro de carga constante análogo ao empregado nos solos, de forma que, a determinação da permeabilidade do geotêxtil pudesse ser realizada segundo a Lei de Darcy. O procedimento acima adotado permite que se compare a permeabilidade do geotêxtil com a do solo, já que são compatíveis. A seguir, apresenta-se a Lei de Darcy para geotêxteis, na sua forma convencional:

$$Q = k i A = k \frac{\Delta h}{T_g} A \quad (II.3)$$

Q = volume por unidade de tempo

k = coeficiente de permeabilidade de Darcy

i = gradiente hidráulico

A = área transversal total disponível para o fluxo

Δh = mudança na carga hidráulica ou perda hidráulica através do geotêxtil

T_g = comprimento do caminho do fluxo (espessura do geotêxtil) onde ocorre Δh

A permeabilidade não é a única maneira de expressar a facilidade com que a água pode atravessar um geotêxtil, já que não existe uma proporção direta entre a velocidade do fluxo e o gradiente hidráulico onde o coeficiente de proporcionalidade é o coeficiente de permeabilidade do meio condutor. Portanto, não se pode tomar que o fluxo através do geotêxtil obedece a Lei de Darcy ou que a perme-

abilidade é constante, visto que o fluxo mesmo para pequenos Δh pode não ser laminar. Apesar destas diferenças entre o lado experimental e o teórico, é possível a obtenção de um coeficiente de Darcy aparente. De tal forma, que se existir a condição de fluxo turbulento durante o ensaio, o valor de "k" medido é conservativo, menor do que o real.

Os métodos para a determinação da permeabilidade do geotêxtil usualmente apresentados são os da ASTM, do Instituto de Franzius de Hannover e do CFGG. Nos procedimentos da ASTM e do CFGG a amostra de ensaio é uma única lâmina de geotêxtil no diâmetro especificado enquanto que no ensaio do Instituto Franzius a amostra é formada pelo empilhamento de lâminas até a espessura mínima de 2 cm. O objetivo deste tipo de amostra é obter uma velocidade de fluxo pequena frente a uma diferença de carga hidráulica reduzida também. O procedimento do Instituto Franzius admite a aplicação de carregamento normal durante o ensaio.

Os geotêxteis não tecidos têm a sua permeabilidade diretamente ligada à tensão normal atuante sobre si. Já com os tecidos, a sua permeabilidade é muito menos afetada pelo carregamento normal, sendo inteiramente controlada pela sua estrutura.

A seguir, fornecem-se alguns exemplos de valores de vazão por m^2 para geotêxteis, frente a uma carga hidráulica de 10 cm (INGOLD e MILLER, 1988). A área drenante aparece por m^2 para facilitar comparações. O objetivo é mostrar como estes valores variam em função da estrutura do geotêxtil. São indicados agora:

- não tecido - 200 l/s por m² para 10 cm de carga;
- tecido com laminete - 10 a 30 l/s por m² para 10 cm de carga;
- tecido monofilamento - 100 a 1000 l/s por m² para 10 cm de carga.

Observam-se, entretanto, que os coeficientes de permeabilidade de dois geotêxteis diferentes, quanto ao processo de fabricação, um fino (0,5 mm) e outro grosso (2,5 mm), podem ser próximos com diferentes vazões para a mesma área drenante e igual carga hidráulica. Isso mostra que a permeabilidade não apresenta uma comparação correta entre os geotêxteis. Uma forma encontrada para evitar a situação acima foi formular um fator de permeabilidade independente da espessura do geotêxtil, chamado de permissividade ("permittivity") e definido como a seguir é indicado:

$$\Psi = \frac{Q}{A \cdot h} \quad (II.4)$$

Na realidade, a permissividade é um parâmetro derivado da permeabilidade e pode ser escrito:

$$\Psi = \frac{k}{T_g} \quad (II.5)$$

onde, k = a permeabilidade de Darcy e T_g = a espessura do geotêxtil.

II.5.3 APTIDÃO A EMBEBIÇÃO

Cada polímero constituinte do geotêxtil apresenta a sua característica de repelência a um líquido. A facilidade com que a água é capaz de penetrar no geotêxtil indica a sua aptidão à embebição ("wettability"). Ocorre que o encolpamento de um geotêxtil pela água está ligado a forças de

tensão superficial e de repulsão entre o polímero, a água e o ar. Interferem também nesta propriedade do geotêxtil a sua porosidade, área específica das fibras e o estado da superfície das fibras. Assim sendo, a água sob um gradiente hidráulico baixo pode não transpor a estrutura seca do produto. Esta dificuldade inicial de assimilação de água pelo geotêxtil é notável nos não tecidos agulhados.

GOURC e FAURE (1990) apresentam um ensaio simples que fornece uma medida da aptidão à embebição do geotêxtil pela água. Resume-se a um tubo transparente que tem em sua base um suporte para a fixação de uma amostra de geotêxtil, sobre a qual eleva-se o nível de água até haver um gotejamento. Os resultados obtidos são a altura de água que ocasionou as primeiras gotas e as áreas molhadas, estabelecidas através de investigação com raios ultravioleta.

II.6 - SOLO, GEOTÊXTIL E ÁGUA

Adiante, abordam-se dois fenômenos sempre considerados no transcorrer da interação solo, geotêxtil e água, cuja importância não está no fato em si de ocorrerem, mas sim na intensidade como se manifestam.

II.6.1 EROÇÃO INTERNA DO SOLO ("PIPING")

Em um sistema de drenagem sob a ação de um gradiente hidráulico as partículas de solo na interface com o filtro de geotêxtil são compelidas a deslocarem-se. O grau em que este fenômeno ocorre é determinado pela interação das características das partículas do solo com as proprie-

dades dos geotêxteis. Estes parâmetros definem as regras do processo de estabilização na interface solo geotêxtil (ROLLIN e OUTROS, 1989). A identificação de certa quantidade de "piping" durante o processo descrito é considerada como normal desde que ocorra a estabilização do processo. A continuação do "piping" destrói a estrutura do solo e pode acarretar a colmatação do dreno.

O "piping" quando ocorre devido a escolha de um geotêxtil de poros muito grandes, inadequado para o solo a ser protegido, apresenta-se sob duas formas, a seguir indicadas: erosão interna do solo propriamente dita e sufusão do solo.

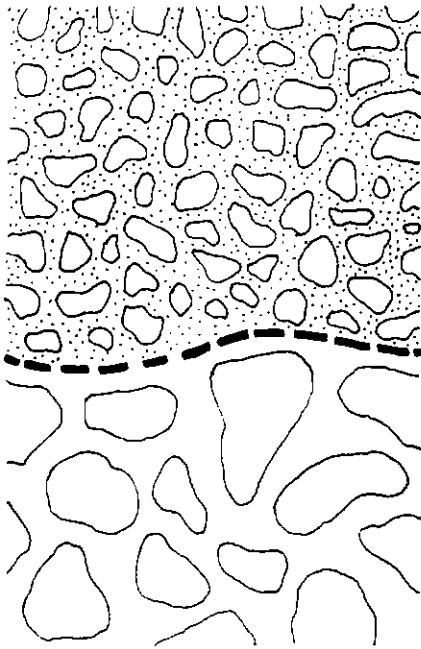
Na erosão interna do solo, mostrada na figura II.8, verifica-se uma perda de partículas de tamanhos variados. Surgem grandes vazios e o fluxo torna-se mais franco e um colapso da estrutura do solo passa a ser eminente.

Já na sufusão do solo as partículas finas migram no interior da estrutura do meio granular que se preserva em grande parte como mostrado na figura II.9. Neste caso, a evolução do processo não conduz ao colapso da estrutura do solo. Se as partículas de solo passarem através do filtro de geotêxtil não se formará uma camada de finos sobre o geotêxtil, o que minimiza os efeitos do processo (JOHN, 1987).

Normalmente a sufusão está associada aos solos de graduação aberta, enquanto a erosão interna está ligada aos solos de graduação uniforme.

ANTES DO FLUXO

DEPOIS DO FLUXO

SOLO
NATURAL

GEOTÊXTIL

PEDREGULHOS

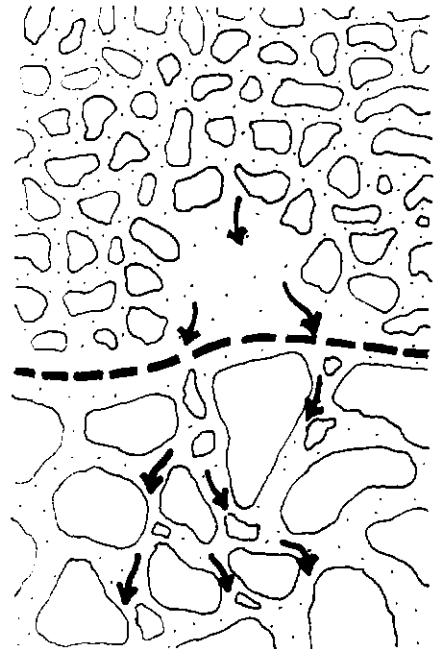
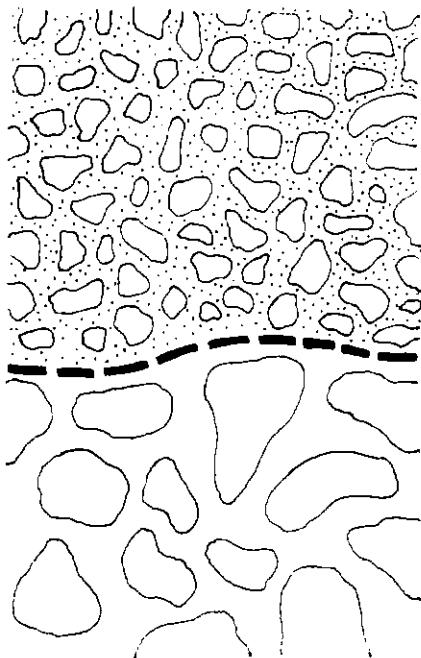


Figura II.8 Erosão Interna do Solo
(JOHN, 1987)

ANTES DO FLUXO

DEPOIS DO FLUXO

SOLO
NATURAL

GEOTÊXTIL

PEDREGULHOS

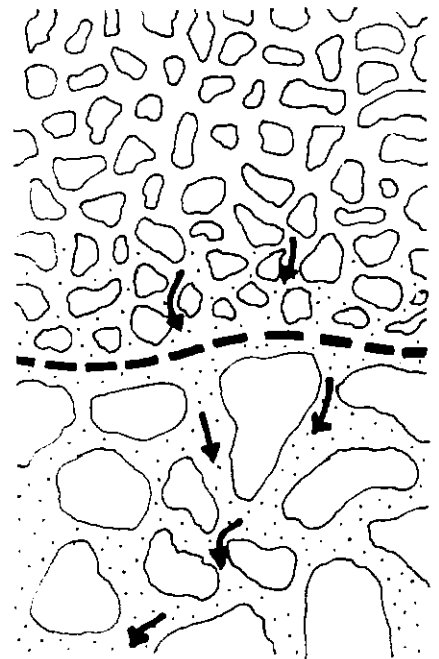


Figura II.9 Sufusão do Solo
(JOHN, 1987)

RYCROFT e DENNIS (1982) informam que os ensaios de permeabilidade revelam que o "piping" raramente configura-se nos geotêxteis usualmente empregados ($0, \mu < 350$ micras). MERWE e HORAK (1989) chegam a afirmar que o "piping" contínuo só verifica-se para situações onde a abertura de filtração é superior a 2000 micras ou mais.

II.6.2 COLMATAÇÃO

Numa situação em que os tamanhos de poro de um geotêxtil frente a um determinado solo não propiciam a instalação de um filtro graduado natural no solo ou o arqueamento das partículas de solo (figuras II.4 e II.5), cria-se a condição para a ocorrência do fenômeno conhecido como colmatação física ("clogging") do geotêxtil. Este fenômeno, cujo mecanismo é puramente físico, apresenta-se em três formas distintas denominadas de colmatação propriamente dita, de bloqueamento ("blocking") e de cegamento ("blinding").

Ten-se o bloqueamento, figura II.10, quando as partículas de solo posicionam-se sobre as aberturas do geotêxtil obturando-as totalmente ou parcialmente. Um certo grau de bloqueamento sempre é esperado, o que não se deve permitir é o que o geotêxtil tenha uma porometria similar a do solo sob pena de ter-se um bloqueamento severo que induziria a uma redução grande da permeabilidade do geotêxtil. é importante notar que o bloqueamento é independente do tempo.

O cegamento, figura II.11, é uma variante do bloqueamento requerendo que a graduação do solo protegido per-

mita a existência da sufusão dos finos e os mesmos sejam grandes para penetrar no geotêxtil. O atendimento a estas condições conduz à formação de uma camada de permeabilidade relativamente baixa sobre a face do geotêxtil, afetando profundamente a capacidade drenante do geotêxtil.

Em termos essenciais, a colmatção é a penetração de partículas do solo com diâmetros próximos às aberturas do geotêxtil que acabam por permanecer entremeadas dentro do geotêxtil, ver figura II.12. De um modo geral a possibilidade de uma colmatção branda já é aguardada e não preocupa, tendo em vista que o critério de permeabilidade para escolha do geotêxtil é bastante seguro. Para dar uma medida do grau de cautela presente num critério de permeabilidade, 75% dos poros de geotêxteis podem mostrar-se colmatados sem que isto ocasione dificuldade para o seu funcionamento (JOHN, 1987).

A colmatção pode também ser comandada por outro tipo de processo de origem físico-química. Neste caso, são causas da colmatção a precipitação mineral, a deposição de sal e o crescimento de bactéria (ROLLIN e LOMBARD, 1988).

É conhecido que, a presença de carbonatos e sulfatos na água possibilita o desenvolvimento de cristais no têxtil, quando a água evapora sob condições atmosféricas. Tal processo, com o transcorrer do tempo, induz à colmatção físico-química do geotêxtil.

O estudo destes mecanismos está fora do escopo desta tese, cujos objetivos estão centrados na investigação dos processos de origem física, que envolvem a filtração dos solos com geotêxteis.

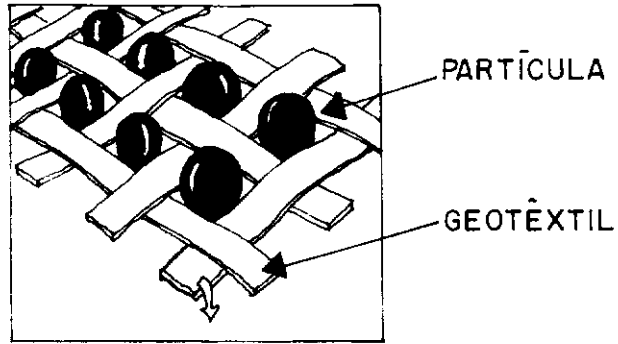


Figura II.10 Bloqueamento
(ROLLIN e LOMBARD, 1988)

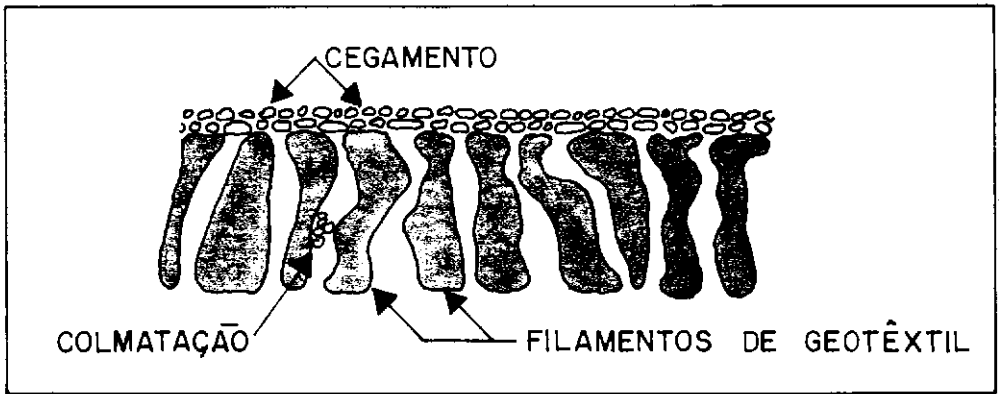


Figura II.11 Cegamento e Colmatação dos Pores dos Geotêxteis
(JOHN, 1987)

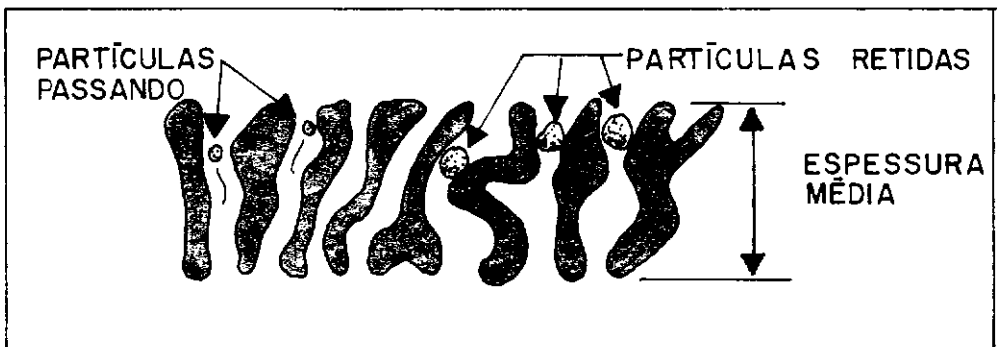


Figura II.12 Colmatação de um Geotêxtil Ligado Mecanicamente de Espessura Grande
(JOHN, 1987)

A colmatação físico-química é de grande importância nos casos em que o filtro está exposto ao ar, como mostrado por FERREIRA (1978).

II.7 - CRITÉRIOS DE PROJETO

II.7.1 FILTRO GRANULAR CONVENCIONAL

Muito do conhecimento sobre o comportamento dos filtros granulares desenvolveu-se a partir da interpretação dos resultados dos programas de ensaios empreendidos por vários pesquisadores; entre esses, citamos: BERTRAM (1940); USCE (1941 e 1953); KARPOFF (1955); SHERARD E OUTROS (1984a,b); KENNEY e LAU (1985); LAFLEUR e OUTROS (1989).

Os filtros naturais são geralmente projetados levando-se em conta um índice que relaciona um diâmetro da partícula do filtro (D) com um diâmetro da partícula do solo protegido (d). Para exemplificar, d_{15} é o diâmetro das partículas de solo protegido correspondente a 15% em peso total de todas as partículas menores do que ele. Os índices normalmente relacionam D_{15} , D_{50} , d_{15} , d_{50} e d_{85} .

SILVEIRA (1963) elaborou uma proposta de dimensionamento de filtros granulares, com base num modelo teórico, que permite fazer uma aproximação da distribuição dos vazios do filtro.

a) Solos não Coesivos

A tabela II.1 apresenta critérios de filtros com a indicação da origem dos mesmos. Estes critérios são específicos para a condição de fluxo permanente, notando-se que

as amostras de solo utilizadas para verificá-los em experimentos de laboratório foram levemente compactadas. Assim sendo, os critérios são próprios para solos granulares que possuam pelo menos uma densidade relativa média. Outro dado significativo sobre os programas de ensaio que contribuíram para os critérios apresentados na tabela II.1 é que o coeficiente de uniformidade dos solos ensaiados foi muitas vezes inferior a 6, o que restringe o campo de aplicação destes critérios (LAFLEUR e OUTROS, 1989).

A coluna 1 da tabela II.1 apresenta números que traduzem o critério de drenagem que torna o filtro suficientemente permeável para não permitir que a pressão na água cresça na região solo-filtro. Além disso, os valores da coluna 1 expressam indiretamente um critério de colmatagem na medida que o tamanho das partículas do filtro será grande o bastante para permitir a passagem das menores partículas do solo protegido através do filtro, sem que estas colmatem os seus poros. A coluna 3 define o critério de retenção ou de "piping", de tal forma que o diâmetro das partículas do filtro precisa ser pequeno o bastante para impedir a passagem das partículas maiores do solo protegido através dos poros do filtro. As partículas maiores retidas, por sua vez, retêm partículas menores do solo protegido (FISCHER e OUTROS, 1990).

Tabela II.1 - Critério de Filtro para Solos não Coesivos
(FISCHER E OUTROS, 1990)

Critério		Tipo de Solo		Origem
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	$D_{15}/d_{15} \leq$	4a5	todos	TERZAGHI(1922) TAYLOR(1948)
4	$\leq D_{15}/d_{15} \leq$	9	uniforme	TERZAGHI(1922) BERTRAM(1940)
6	$\leq D_{15}/d_{15} \leq$	18	não uniforme anguloso	USBR(1955)
12	$\leq D_{15}/d_{15} \leq$	40	não uniforme subarredondado	USBR(1955)
5	$\leq D_{50}/d_{50} \leq$	10	uniforme	USBR(1955)
9	$\leq D_{50}/d_{50} \leq$	30	não uniforme anguloso	USBR(1955)
12	$\leq D_{50}/d_{50} \leq$	58	não uniforme	USBR(1955)

Trabalhos publicados mais recentemente sobre filtração em solos não coesivos, SHERARD e OUTROS (1984 a,b), KENNEY e LAU (1985), e LAFLEUR e OUTROS (1989), lançam luz sobre o problema, trazendo um melhor entendimento sobre o assunto, bem como, uma ampliação nos seus limites, que a seguir se aborda.

- Tamanho da Abertura de Filtração

SHERARD e OUTROS (1984 a) realizaram uma série de ensaios de filtração de curta duração (5 a 10 minutos) com areias uniformes como solo protegido e como filtros areias e pedregulhos de origem fluvial com D_{15} de 1,0 a 10,0 mm. O objetivo foi o de investigar carreamento de partículas. A água para o equipamento de ensaio era fornecida pela abertura rápida de um registro (em torno de 400 kPa de pressão)

que alimentava a parte superior do permeâmetro, o que induzia no início do ensaio a formação de uma suspensão do solo protegido (areia). Estes ensaios mostraram um limite claro entre o sucesso ou a ruptura do filtro expresso por $D_{15}/d_{85}=9$ ou $d_{85}=0,11D_{15}$, de tal forma que areias uniformes com d_{85} menores do que $0,10D_{15}$ sempre atravessam o filtro e quando as mesmas tem d_{85} maior do que $0,12D_{15}$ são sempre retidas pelo filtro.

Uma comparação do resultado nos ensaios realizados por SHERARD e OUTROS (1984a) que verificaram $D_{15}/d_{85} = 9$, com o critério de Terzaghi (1922), $D_{15}/d_{85} = 4$, mostra que este último apresenta um fator de segurança implícito de aproximadamente 2. Assim o critério original do índice de retenção de Terzaghi igual 4 é conservativo. No entanto, a performance obtida por filtros de barragem projetados com o critério de Terzaghi (1922) é quase sempre satisfatória, e geralmente não produz um aumento significativo de custo. Desse modo, SHERARD e OUTROS reafirmam o critério de Terzaghi (1922) e indicam $D_{15}/d_{85} < 5$ como o principal critério de aceitação de filtros.

- Tamanho Representativo para o Solo Protegido

O tamanho significativo do solo protegido a ser considerado nos critérios de filtro é o tamanho do grão de solo que envolve uma migração mínima de partícula no mecanismo de auto-filtração (LAFLEUR e OUTROS, 1989). SHERARD e OUTROS (1984a) afirmam que se d_{85} do solo protegido é adequadamente retido pelo filtro (mesmo argilas arenosas e siltes arenosos bem graduados), este também é capaz de reter as partículas mais finas do solo protegido, fazendo com que se adote para d o d_{85} do solo. KENNEY e LAU (1985) tem

reservas quanto a esta afirmação no que se refere a solos medianamente uniformes a desuniformes (coeficiente de uniformidade maior do que 6). Eles sugerem, de forma intuitiva, que o tamanho de partícula médio (d_{50}) é o valor a ser usado numa seleção criteriosa de um filtro.

A quantidade de perda de partículas é um assunto ainda muito debatido e também sujeito à elevada dose de subjetividade. Porém é claro que um mínimo de perda de partículas é necessário para o desenvolvimento de um estado de equilíbrio na interface filtro-solo (LAFLEUR e OUTROS, 1989).

- Solos Amplamente Graduados não Coesivos

São solos cujas curvas granulométricas estendem-se pelo menos por três intervalos logarítmicos com coeficientes de uniformidade elevados. Estes solos são passíveis de mostrarem graduação aberta e segregação, além de existir a possibilidade de serem instáveis internamente. A estabilidade interna refere-se à capacidade desses solos não coesivos evitarem a perda de suas próprias partículas pequenas devido a solicitações resultantes da força de percolação da água ou de alguma força dinâmica.

O critério atual do U.S.Army Corps of Engineer (1986), para os solos amplamente graduados, despreza a parcela de tamanhos de grãos maiores da curva granulométrica e utiliza d_{50} obtido da curva granulométrica da matriz fina do solo protegido. Tal procedimento ainda revela um grau de empirismo na solução do problema.

De forma a avaliar a estabilidade de um solo não coesivo KENNEY e LAU (1985) desenvolveram um método gráfico, que leva em conta a forma da curva granulométrica. Com

o objetivo de classificar, quanto à estabilidade, os solos amplamente graduados LAFLEUR e OUTROS (1989) nomearam três grupos: solos linearmente graduados; solos de graduação aberta; e solos internamente instáveis. Os perfis típicos das curvas granulométricas destes grupos são mostrados na figura II.13.

Solos linearmente graduados tem aproximadamente 20% de partículas grossas que se distribuem na matriz de partículas finas de tal forma que as primeiras não interagem no processo de filtração e podem ser desprezadas. Estes solos são geralmente internamente estáveis.

Solos de graduação aberta caracterizam-se por não apresentarem partículas dentro de um intervalo de tamanhos. Como resultado da ausência de uma fração do grão a curva granulométrica apresenta um patamar no citado intervalo. Para estes solos, a forma da curva deve ser sempre analisada para avaliar a estabilidade interna dos solos.

Solos internamente instáveis apresentam uma estrutura que permitem o movimento dos finos através do seu próprio esqueleto de partículas grosseiras (fenômeno já descrito anteriormente, conhecido como sufusão). A curva granulométrica destes solos exhibe concavidade para cima, ver figura II.13.

- Permeabilidade do Filtro

Estudos realizados por SHERARD e OUTROS (1984a) com ensaios de permeabilidade sobre areias e pedregulhos normalmente utilizados como filtros ou drenos em barragens, com D_{10} dentro do intervalo de 0,1 a 10mm, compactados até apresentarem em torno de 70% de grau de compactação mostraram uma boa correlação entre os valores médios de k e D_{10} .

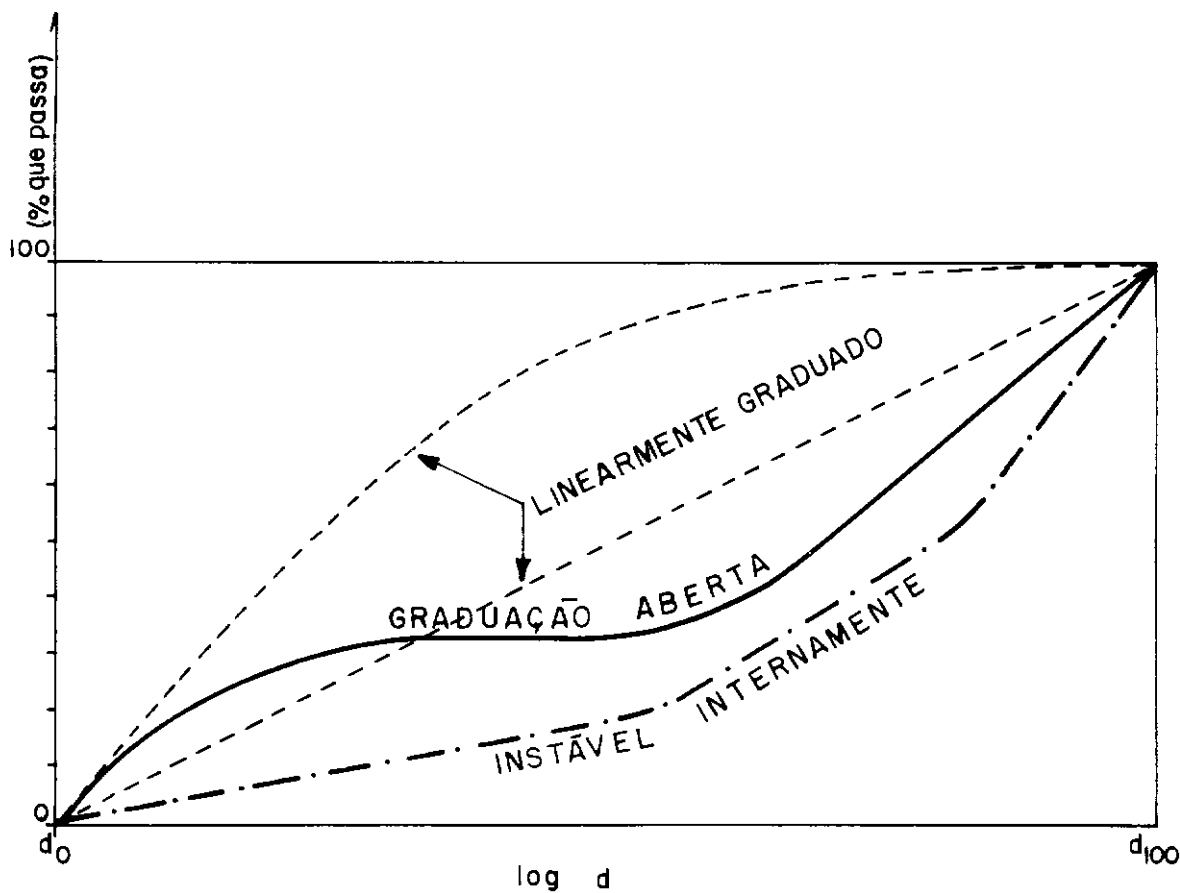


Figura II.13 Classificação das Curvas Granulométricas dos Solos Amplamente Graduados

expressos pela relação:

$$k = 0,35 (D_{15})^2 \quad (II.6)$$

onde k está em centímetro por segundo e D_{15} em milímetros.

b) Solos Coesivos

Uma investigação foi empreendida por SHERARD e OUTROS (1984b) através de um ensaio de filtração conhecido como ensaio de lama ("slurry test"), cujos solos protegidos variaram aproximadamente desde siltes não coesivos até argilas plásticas. A menos de solos residuais tropicais, os solos ensaiados são representativos dos solos finos usualmente empregados em zonas impermeáveis de barragens. Assim sendo, foi realizada uma bateria de ensaios para cada solo protegido com vários filtros de diferentes D_{15} no intuito de determinar um valor limite para D_{15} de forma que, quando o filtro era mais fino que o limite, os resultados eram satisfatórios e para filtros mais grossos os resultados eram insatisfatórios.

Uma das conclusões do trabalho é que para todos os solos protegidos a relação D_{15}/d_{85} superou o valor 9, de tal forma que, para muitas argilas D_{15}/d_{85} alcançou 25 e em algumas superou 50.

Por outro lado, a literatura técnica corrente de barragens é pobre sobre filtros para argila finas. No entanto, entre os projetistas de barragens há um consenso que uma areia pura ou uma areia com pedregulhos encerrando uma porção de areia fina e cujo D_{15} situe-se em torno de 0,5 milímetros, ou menos, é um filtro apropriado mesmo para as argilas mais finas.

SHERARD e OUTROS (1984 b) com base no programa de ensaios de filtração, citado anteriormente, fazem as seguintes recomendações para filtros a serem utilizados frente a solos coesivos:

- para argilas e siltes arenosos em que a parcela arenosa seja significativa (d_{60} de 0,1 - 0,5mm), o critério tradicional, $D_{15}/d_{60} \leq 5$ é conservativo e razoável.
- para argilas de graduação fina com d_{60} entre 0,03 e 0,10mm, uma areia pura ou areia com pedregulhos com D_{15} médio $\leq 0,5$ mm mostram-se adequadas.
- para siltes finos de baixa coesão em que a presença de areia não é significativa (d_{60} entre 0,03 e 0,10mm) e apresentam baixa plasticidade ($LL < 30$), a areia ou filtro de areia com pedregulhos com D_{15} médio $\leq 0,3$ mm são próprios.
- para solos excepcionalmente finos como argilas e siltes com $d_{60} < 0,02$ mm, que são raros na natureza, são filtrados de forma adequada por material granular que apresente $D_{15} \leq 0,2$ mm. Convém ressaltar que, somente um solo com as características desse grupo foi ensaiado no referido programa.

II.7.2 GEOTÊXTIL

Os critérios de projeto de um filtro de geotêxtil são baseados nas prescrições recomendadas para a escolha de um filtro granular convencional, assim como, na experiência e em dados de laboratório, ainda em quantidade limitada. Estes critérios, em geral, não consideram mudanças nas propriedades do solo na interface solo-geotêxtil, efeitos da

estrutura do solo e do geotêxtil, compressibilidade e porosimetria do geotêxtil. Tais limitações dos métodos existentes são compensadas pela adoção de fatores de segurança elevados nos projetos. Outra abordagem sobre a questão é a realização de ensaios de filtração do sistema solo-geotêxtil, com objetivo de avaliar a importância e o significado de fenômenos e propriedades envolvidas que não são adequadamente contempladas nas considerações de projeto (WILLIAMS E LUETTICH, 1990)

Tendo presente o que foi colocado acima, os critérios de projeto para o filtro de geotêxtil devem atender aos três requisitos básicos exigidos de um filtro:

- permeabilidade (eficiência hidráulica);
- capacidade de retenção (eficiência mecânica);
- vida de serviço (eficiência ao longo do tempo).

Desse modo apresentamos, a seguir, quatro dos critérios mais utilizados para a finalidade proposta:

a) Critério do Comitê Francês de Geotêxteis e Geomembranas (CFGG)

O critério estabelece a seguinte relação para dimensionar a capacidade de retenção do filtro de geotêxtil,

$$FOS < C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4 \times d_{95} \quad (II.7)$$

onde FOS ("Filtration Opening Size") é o tamanho da abertura de filtração do geotêxtil podendo ser determinado, como explicado em II.5.1.b), por três principais metodologias (O_{95} , D_w , D_{95}). C_1 a C_4 são, respectivamente, coeficientes relativos ao gradiente hidráulico, à densidade do solo, à

granulometria do solo, às funções do geotêxtil, apresentados a seguir. E d_{85} é o diâmetro do solo, cujo tamanho corresponde a 85%, em peso do total, de todas as partículas menores do que ele.

Coeficiente	Valor	Aplicação
C_1	1,00	solos bem graduados e contínuos
	0,80	solos uniformes e contínuos
C_2	1,25	solos densos e confinados
	0,80	solos fofos e desconfinados
C_3	1,00	gradiente hidráulico, $i < 5$
	0,80	gradiente hidráulico, $5 < i < 20$
	0,60	gradiente hidráulico, $20 < i < 40$
C_4	1,00	uso somente para filtração
	0,30	uso para filtração e drenagem

A permeabilidade do geotêxtil deve obedecer a seguinte condição,

$$K_g > A K_s \quad (II.8)$$

onde K_g é a permeabilidade do geotêxtil em m/s. A é um coeficiente adimensional para a permeabilidade, apresentado a seguir. E K_s é o coeficiente de permeabilidade do solo em m/s.

Coeficiente (A)	Aplicação
$10^{-3} T_g$	gradientes baixos e solos lisos
$10^{-4} T_g$	gradientes baixos e solos de permeabilidade baixa
$10^{-5} T_g$	gradientes elevados e obras de grande responsabilidade

Nota: T_g é a espessura do geotêxtil em metro

b) Critério do Federal Highway Administration (FHWA)

No que se refere à capacidade de retenção do geotêxtil, o critério do FHWA apresenta um tratamento específico de acordo com a granulometria do solo, ver a seguir.

Solo	Critério	Aplicação
< 50% passando na peneira 200 (areias)	fluxo permanente $AOS < B_{des}$	$CU < 2$ ou $CU > 8 \Rightarrow B = 1$ $2 < CU < 4 \Rightarrow B = 0,5 CU$ $4 < CU < 8 \Rightarrow B = 8/CU$
	fluxo dinâmico, fluxo em dois sentidos $AOS < d_{10}$	- -
> 50% passando na peneira 200 (finos)	fluxo permanente $AOS < d_{es}$ $AOS < 1,8 d_{es}$	geotêxteis tecidos geotêxteis não tecidos
	fluxo dinâmico fluxo em dois sentidos $AOS < 0,5 d_{es}$	- -

Nota: O AOS é o tamanho da abertura de filtração do geotêxtil, segundo a metodologia americana.

A permeabilidade do geotêxtil deve atender a relação a seguir,

$$K_g > C K_s, \quad (II.9)$$

onde K_s é a permeabilidade do solo e os valores do coeficiente adimensional C são mostrados a seguir.

Coeficiente (C)	Aplicação
1	gradientes baixos e solos estáveis
10	gradientes elevados e solos instáveis

O último requisito abordado pelo critério do FHWA é quanto a colmatação, a seguir apresentado.

Critério	Geotêxtil	Aplicação
GR < 3	-	severa
Percentagem de área aberta > 4%	tecido	não severa
Porosidade > 30%	não tecido	

Nota: GR ("Gradient Ratio") é relação i_1/i_2 , onde i_1 e i_2 são gradientes hidráulicos, respectivamente, da camada de solo adjacente ao geotêxtil e da camada de solo mais afastada do geotêxtil no ensaio de filtração do sistema solo-geotêxtil.

c) Critério da Universidade de Grenoble e da Escola Politécnica de Montreal (IRIGH/EPH).

A capacidade de retenção do geotêxtil é dimensionada a partir do critério a seguir indicado.

Critério	Aplicação
FOS < 1,5 d_{es}	solos uniformes
1,5 < FOS/ d_{es} < 3,0	solos bem graduados

d) Critério de GIROUD (1982 e 1988)

O critério de retenção é dirigido para solos não coesivos, quando usado para argilas com alta coesão torna-se conservativo. Apresenta-se o critério, a seguir.

CU' do Solo	Critério	Aplicação
$1 < CU' < 3$	$AOS < (CU')^{0.3} d_{es}$	solo fofo
	$AOS < 2 (CU')^{0.3} d_{es}$	solo compacto
$CU' > 3$	$AOS < 9 (CU')^{-1.7}$	solo fofo
	$AOS < 18 (CU')^{-1.7}$	solo compacto

O CU' é o coeficiente de uniformidade determinado a partir da curva granulométrica linearizada. Eliminam-se as partículas mais finas e mais grossas que são menos importantes na estabilidade da estrutura do solo, como mostrado na figura II.14. No Caso dos solos de graduação aberta, figura II.15, não é possível linearizar a curva granulométrica. O solo 1, figura II.15, é um pedregulho argiloso ou siltoso contendo menos de 30% de partículas finas, em cuja estrutura não há um preenchimento dos espaços formados pelo esqueleto de partículas grossas. Desta maneira, o solo 1 mostra-se instável sob a ação de um fluxo d'água (GIROUD, 1982). Como já foi visto anteriormente, a instabilidade do solo redonda ou em cegamento do geotêxtil se o mesmo possui abertura de filtração menor do que as partículas finas do solo instável, ou num determinado grau de colmatação do dreno se o geotêxtil não for capaz de reter os finos (JOHN, 1987). O solo 2, figura II.15, um pedregulho argiloso ou siltoso contendo mais que 30% de partículas finas, apresenta uma estrutura em que as partículas grossas estão dispersas na matriz fina sem que haja contato entre elas. Neste caso, considera-se somente a parte da curva granulométrica relativa a porção fina do solo para o critério de retenção.

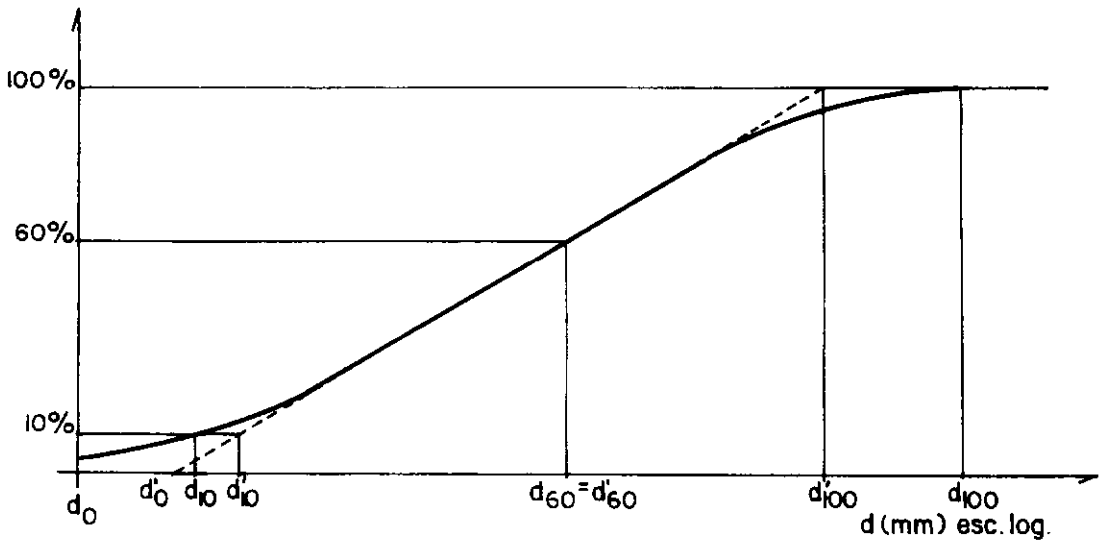


Figura II.14 Curva Granulométrica
(GIROUD, 1982)

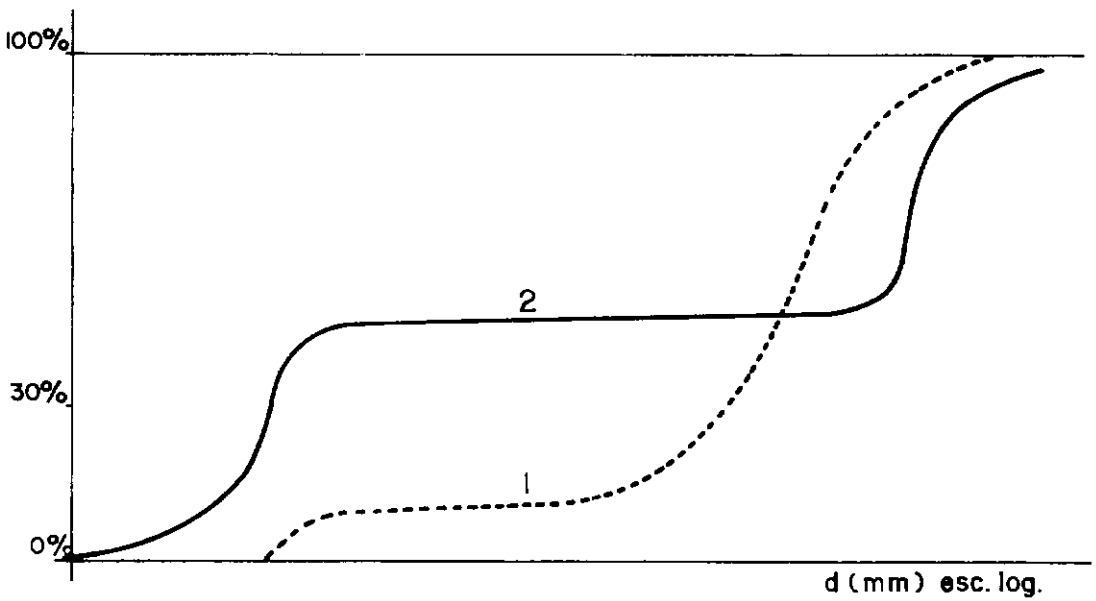


Figura II.15 Curva Granulométrica de Dois Solos
de Graduação Tipicamente Aberta
(GIROUD, 1982)

A permeabilidade do geotêxtil deve atender a seguinte condição, segundo GIROUD (1988).

$$K_g > I_s K_s \quad (II.10)$$

onde K_g e K_s são as permeabilidades do geotêxtil e do solo, respectivamente, e I_s é o gradiente hidráulico no solo. É recomendável a adoção de um fator de segurança de 10 ou mais quando a perda de permeabilidade do filtro pode acarretar consequências catastróficas, por exemplo, ruptura de uma barragem ou massa de solo de um talude. Notar que o valor de K_g usado em (II.10) deve ser medido na mesma tensão de compressão esperada no campo.

A seguir, ainda apresentam-se mais dois critérios, específicos para a questão da filtração.

a) Critério do Código da Alemanha Ocidental (1987) para Filtros de Geotêxtil

Este critério identifica três diferentes comportamentos de filtração em drenagem profunda, a partir da definição de três regiões no gráfico percentagem do que passa versus diâmetros das partículas, como mostrado na figura II.16. A região I abriga os solos coesivos, que resultam em solos estáveis. Para solos dessa região é recomendada a seleção de geotêxteis mais abertos. A região II abrange siltes e areias finas, onde o cuidado para o projeto de filtro de geotêxtil deve ser maior. A região III envolve solos granulares, é uma área que requer mais atenção que a região II. Porém não se sabe se as regiões aqui descritas foram estabelecidas a partir de ensaios de filtração do sistema solo-geotêxtil ou estão galgadas em um análise global (LAWSON, 1990).

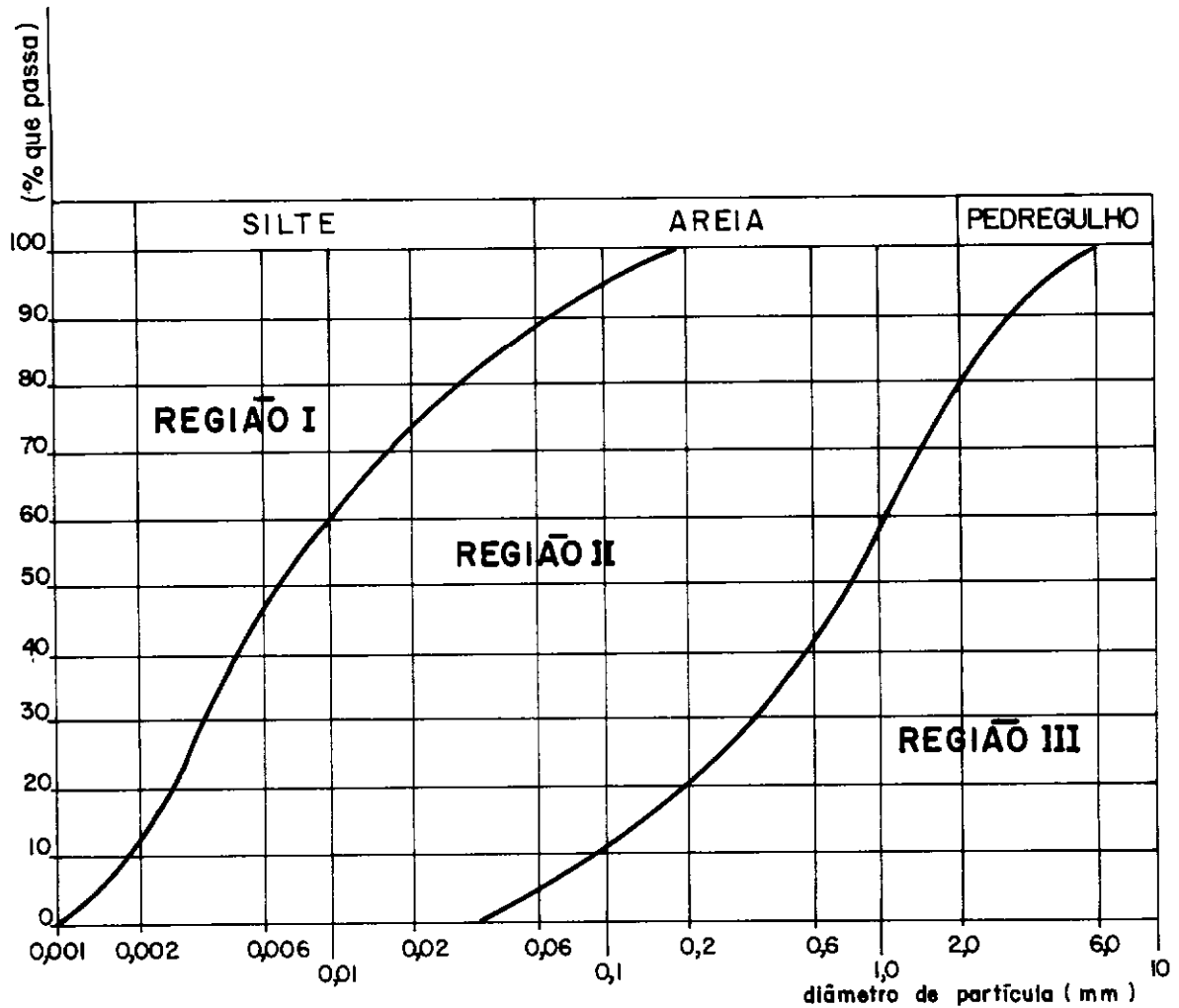


Figura II.16 Regiões com Diferentes Comportamentos de Filtração em Drenagem Profunda

(FSV, 1987)

Para o enquadramento de um solo na região II, além dos limites granulométricos já estabelecidos, este deve apresentar coeficiente de uniformidade menor que 15 e índice de plasticidade menor que 15%. E exige-se para os solos dessa região que,

$$D_w < d_{90} \quad (II.11)$$

onde D_w é o tamanho da abertura de filtração segundo o método do Instituto Franzius de Hannover.

Já os solos da região III devem obedecer o critério abaixo:

$$D_w < 2 d_{90} \quad (II.12)$$

b) Critério de MLYNAREK (1985)

Este critério foi desenvolvido com o suporte de uma análise probabilística elaborada por SILVEIRA (1963). O critério de filtro de geotêxtil é:

$$2d_{15} < AOS < 2 d_{85} \quad (II.13)$$

II.8 - COMENTÁRIOS

Hoje, através do esforço de pesquisa realizado na área de filtração de solos com geotêxtil, já dispõe-se de uma conceituação e de um conhecimento acumulado que permite estabelecer um certo nível de entendimento da interação solo-geotêxtil, assim como é possível nomear e quantificar características físicas do geotêxtil ligadas à filtração.

Apesar do atual estágio da técnica de filtração de solos com geotêxteis, os critérios de projeto ainda são simplistas e trazem agregados a si fatores de segurança elevados para compensar suas deficiências. O aperfei-

çoamento da técnica de realização de ensaios de laboratório, tornando-a mais representativa das condições de uso do geotêxtil em campo, possibilitaria a melhoria da previsão da performance dos geotêxteis na filtração do solo.

CAPÍTULO 3

EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO PARA ENSAIOS DE FILTRAÇÃO

III.1 - INTRODUÇÃO

Apresenta-se neste capítulo um levantamento bibliográfico sobre técnicas de ensaio de filtração. Os trabalhos relacionados expressam as principais tendências existentes neste campo de estudo.

É descrito também o equipamento para ensaio de filtração, especialmente desenvolvido para este trabalho de tese. Enfoca-se a concepção do mesmo e discutem-se as possibilidades de ensaio por ele oferecidas.

III.2 - PESQUISAS ANTERIORES

Segue-se um levantamento bibliográfico sobre ensaios de filtração em solo com geotêxtil. Neste levantamento foi dado maior ênfase às técnicas e equipamentos utilizados.

RYCROFT e JONES (1982)

O permeâmetro empregado nesta pesquisa é apresentado na figura III.1. Água da torneira foi utilizada nestes ensaios. A montagem do permeâmetro é feita com as seguintes etapas. Um disco de geotêxtil de 200 mm, previamente pesado, é posicionado sobre o agregado na base. Daí, uma célula

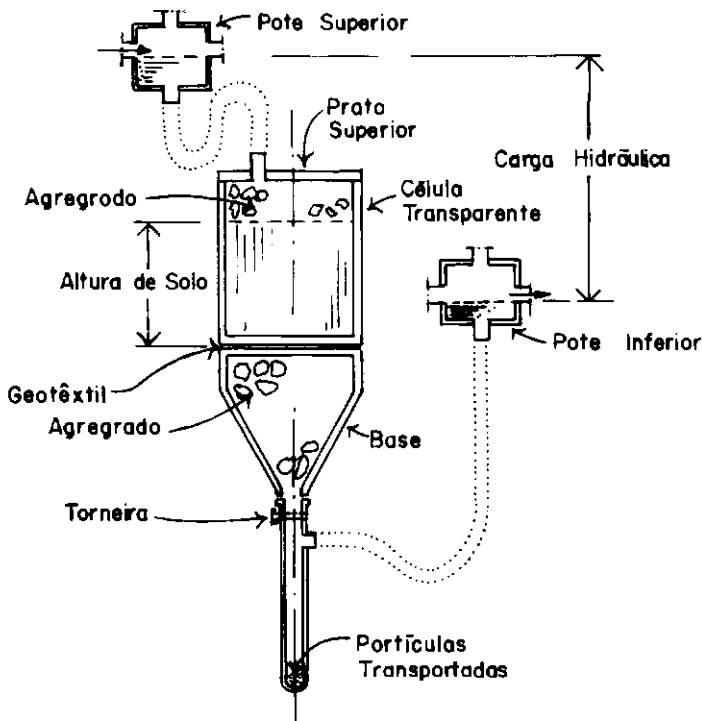


Figura III.1 Permeâmetro Utilizado por RYCROFT e JONES (1982)

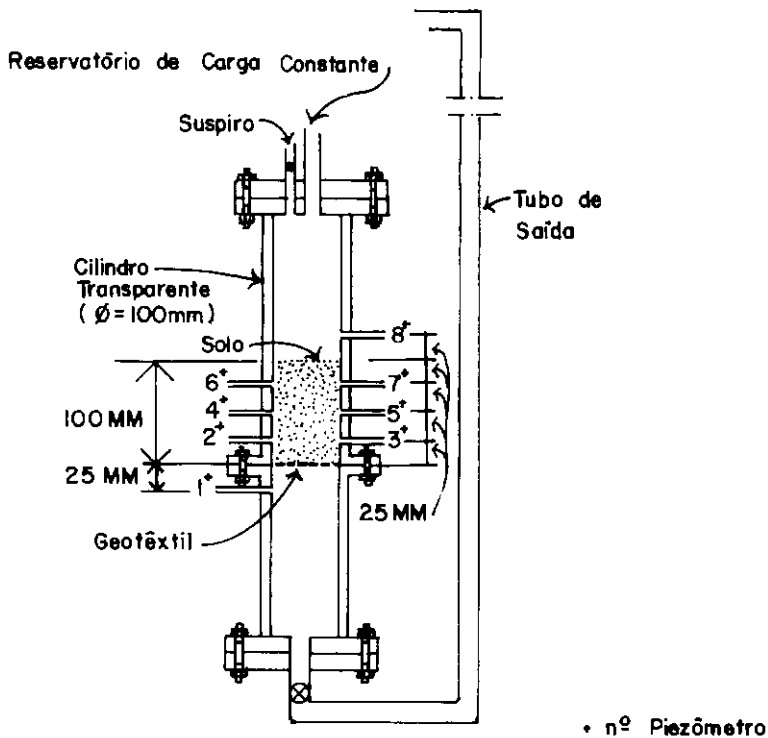


Figura III.2 Permeâmetro do Método "Gradient Ratio" (CALHOUN, 1972)

transparente é conectada à base e então preenchida com camadas de solo. Terminada a colocação do solo, a parte superior da célula é então preenchida com agregado e o prato superior conectado. O ensaio é realizado com fluxo de água constante.

Nesta pesquisa, chegaram-se às seguintes conclusões:

- são comuns reduções do valor da permeabilidade inicial na ordem de dez vezes;
- a natureza esporádica e variações inconsistentes dos resultados podem ser causados pelo uso de água não deaerada, assim como pelas características das amostras de solo (amostras deformadas);
- em solos sujeitos à sufusão, o filtro pode retardar a migração de partículas e fazer com que a permeabilidade da região junto ao geotêxtil passe a condicionar o fluxo de água;
- evidências sugerem que a fase inicial de um "piping", que tende a estabilização, envolve 2% a 3% da massa de solo, uma quantidade maior que 3% estará associada a um "piping" contínuo.

Os autores finalizam afirmando que a performance do solo é um fenômeno complexo que nem a permeabilidade nem o piping podem com segurança serem previstos a partir da análise granulométrica. Solos de graduação aberta podem apresentar baixa permeabilidade devido à sufusão. É provável que a permeabilidade de solos deformados caia com o tempo, sendo que a escolha de filtros muito apertados acelera o processo. Nos solos não homogêneos, a opção por filtros mais abertos minimiza o bloqueamento do geotêxtil,

sendo este um aspecto importante a ser considerado em projetos.

HALIBURTON e WOOD (1982)

Estes autores utilizaram nos seus estudos de filtração o equipamento desenvolvido por CALHOUN (1972) no U.S. Army Corps of Engineers. O permeâmetro de Calhoun é de carga constante, com oito piezômetros, figura III.2. Piezômetro nº1 mede a carga imposta pela altura do tubo de saída, os piezômetros de numeração de 2 a 7 medem a carga hidráulica em vários locais dentro do solo, o piezômetro nº8 mede a carga imposta pelo reservatório de carga constante. Este permeâmetro é capaz de estabelecer uma medida direta do potencial de colmatção de um geotêxtil, chamado de "Gradient Ratio" (GR), definido como o gradiente hidráulico através da porção inferior de solo (25 mm) incluindo o geotêxtil, dividido pelo gradiente hidráulico na porção da amostra de solo na zona compreendida entre 25 mm e 75 mm acima do geotêxtil. Segundo ensaios realizados no Corps of Engineers com o equipamento de Calhoun, valor de GR excedendo a 3 significa colmatção do geotêxtil. O Corps of Engineers estabeleceu a condição GR igual a 3 com a condição limite nas especificações de aceitação de geotêxteis para ensaios de permeabilidade solo-geotêxtil.

Na execução do ensaio, uma amostra de solo de 100 mm de espessura, previamente seca e destorroada, é colocada no permeâmetro. A célula é preenchida com água da torneira vagarosamente de baixo para cima, de forma a minimizar os distúrbios no solo. O tubo de saída regula o gradiente de-

sejado.

O programa de ensaios foi montado com o intuito de comparar a performance hidráulica de geotêxteis dando ênfase ao potencial de colmatação dos geotêxteis. Seis geotêxteis, representando tipos disponíveis no mercado, foram utilizados na pesquisa. O solo utilizado possuía graduação aberta e foi preparado a partir da mistura da areia de Ottawa ASTM C-190 com o silte de origem eólica de Vicksburg nas percentagens de 0%, 5%, 10%, 20%, 25%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% e 80% em peso.

Para cada um dos solos foi realizada uma bateria de ensaios. O gradiente variou de 1 para baixas percentagens de silte até 10 para altas percentagens. O GR foi determinado após 24 horas de ensaio.

Observou-se que, o valor de GR aumenta suavemente com a percentagem de silte no solo até que o valor 3 seja alcançado. A partir de então passa a ocorrer um aumento muito acelerado de GR com a percentagem de silte existente no solo. As mudanças significativas na percentagem inicial de silte na amostra limitam-se somente ao trecho até 6 mm acima do geotêxtil. Para todas as amostras em que ocorreu perda de silte ela se deu somente entre os 10 e 15 minutos iniciais de ensaio, com a maioria das perdas ocorrendo nos 5 primeiros minutos. O fenômeno descrito foi percebido através da descoloração d'água.

O trabalho conclui que o ensaio do "Gradient Ratio" do U.S. Army Corps Engineer é um método aceitável para avaliar e qualificar o potencial de colmatação dos geotêxteis. Ainda que o EOS, que fornece uma medida da abertura do geotêxtil, não apresentou relação com a colmatação do

geotêxtil. E em geotêxteis tecidos a percentagem de área aberta (PAA) mostrou estar diretamente relacionada com a resistência à colmatação do geotêxtil.

CHRISTOPHER e HOLTZ (1985)

Neste trabalho os autores apresentam uma proposta de padronização da metodologia de ensaio de permeabilidade do sistema solo-geotêxtil, intitulada "Gradient Ratio". O permeâmetro utilizado é o mesmo empregado por CALHOUN, 1972. (Figura III.2), a menos dos piezômetros 4,5 e 8 que foram eliminados.

Na realização do ensaio, a água deve ser deaerada de tal forma que a quantidade de oxigênio dissolvido seja menor que seis partes por milhão. No preparo da amostra o solo é inicialmente peneirado e a parcela maior que 19 mm não é utilizada no ensaio. A altura da amostra de solo é de 100 mm, sendo esta posicionada no interior do permeâmetro numa condição de baixa compactidade pelo derramamento do solo seco através de um funil. As entradas dos piezômetros são protegidas por uma tela de forma a impedir o acesso do solo nestas aberturas. Os autores do trabalho recomendam que o ensaio seja efetuado em amostras de baixa compactidade, pois esta condição além de representar uma facilidade executiva no preparo das amostras representa uma situação mais severa do que a de campo, e portanto, leva a resultados sempre conservativos. A saturação da amostra é feita de baixo para cima mantendo-se a diferença de cargas hidráulicas no pote de alimentação e na frente de saturação sempre inferior a 25 mm.

No início propriamente dito do ensaio, o gradiente hidráulico deve ser mantido no valor de 1. Isto representa uma condição de fluxo no campo de normal a severa. Após a estabilização das leituras de fluxo d'água o ensaio pode ser então repetido no gradiente de projeto ou num gradiente mais severo.

Um segundo procedimento de ensaio proposto pelos autores do trabalho é que a partir do valor 1 deve elevar-se o gradiente até o valor 10 em quatro estágios ($i=2,5; 5; 7,5; 10$) em intervalos de tempo em que se permita a estabilização dos piezômetros, garantindo um intervalo mínimo de 30 minutos. Após a estabilização das leituras dos piezômetros para a condição de gradiente 10, o fluxo d'água deverá ser mantido por mais de 24 horas procedendo-se, então, a leitura final dos piezômetros e da vazão. O "Gradient Ratio" é calculado, assim, para esta última leitura.

WEI, VIGO, GOSWAMI e DUCKETT (1985)

O equipamento para ensaios de filtração solo-geotêxtil desenvolvido pelos autores deste trabalho, figura III.3, tem como base o permeâmetro de RYCROFT e JONES (1982). As modificações introduzidas no sistema foram as seguintes: (a) os tubos de entrada e saída d'água foram alargados para 12,3 cm de diâmetro de forma a reduzir as perdas de carga hidráulica nestas partes; (b) uma bomba para recircular a água em circuito fechado, permitindo que, mais facilmente, a temperatura da água seja mantida constante e com menor quantidade de ar dissolvido; (c) um novo

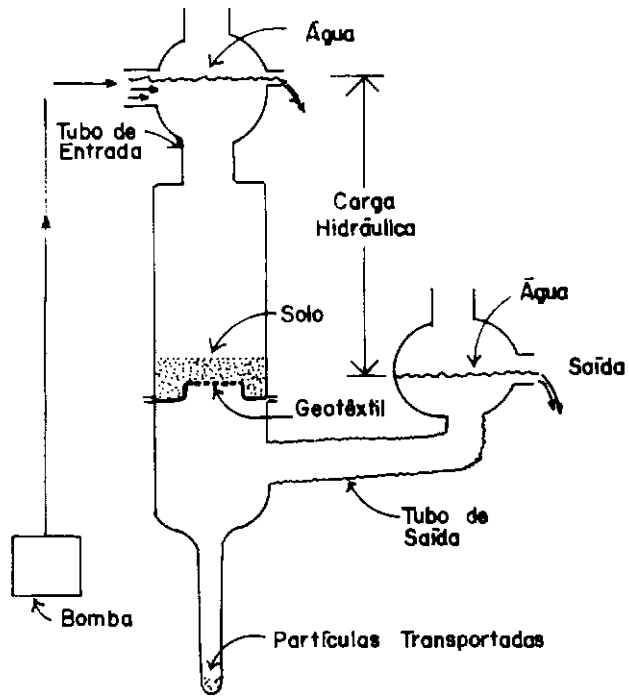


Figura III.3 Equipamento Desenvolvido por WEI e outros (1985)

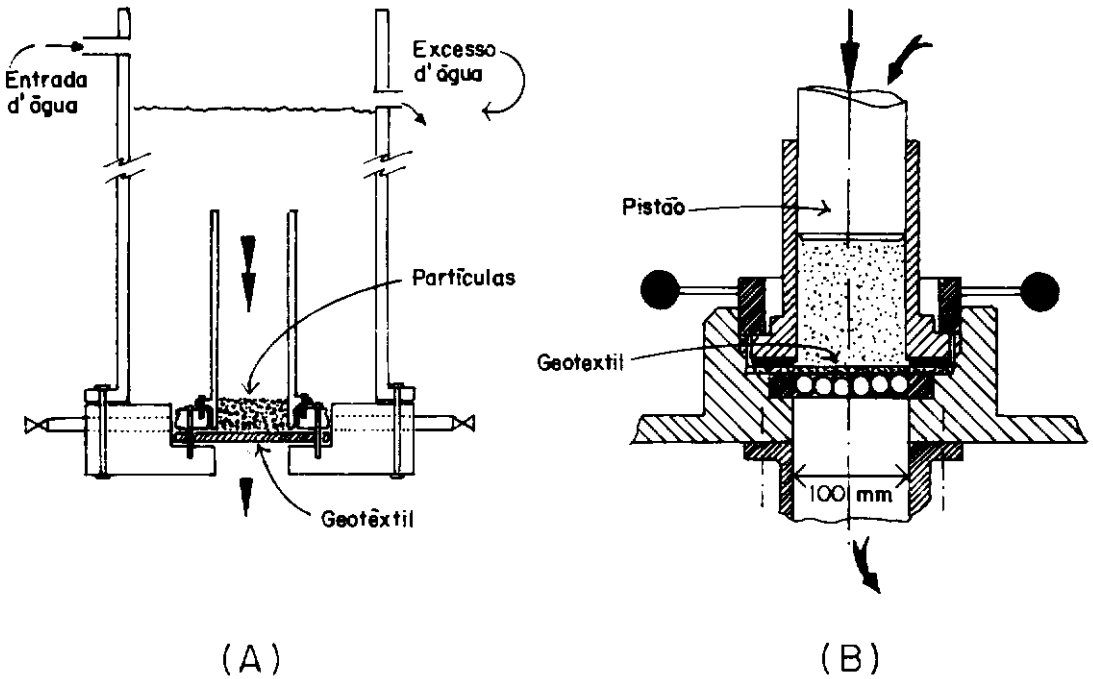


Figura III.4 Permeâmetro da EPM (A) e a IRGM (B)

desenho para o suporte do geotêxtil, figura III.3, para facilitar a instalação do mesmo.

O solo é derramado no interior do permeâmetro sendo compactado em camadas de 1,6 a 2,6 cm até a espessura desejada. A saturação do sistema é feita de baixo para cima. Para evitar o desenvolvimento de algas a água do ensaio é trocada semanalmente.

Nos ensaios de filtração realizados, foi verificado que solos com finos ensejavam a formação de uma suspensão, cujos sólidos depositavam-se sobre a interface solo-água, produzindo uma camada quase impermeável. Esta camada de sedimentos passava deste modo a controlar a vazão do sistema.

FAURE, GOURC, BROCHIER e ROLLIN (1986)

Este trabalho foi desenvolvido em conjunto pela Universidade de Grenoble (IRIGM) e pela Escola Politécnica de Montreal (EPM). É o resultado de estudo experimental do comportamento do solo em contato com o filtro de geotêxtil.

Os permeâmetros utilizados no estudo estão indicados na figura III.4. A técnica de ensaio desenvolvida pela EPM é a seguinte: a amostra de solo não compactada, sendo posicionada no interior da célula sem confinamento na espessura de 35 mm; o ensaio é realizado sob carga hidráulica constante mantendo um gradiente de valor 10. A técnica desenvolvida pela IRIGM é descrita a seguir: o solo levemente umidificado é posicionado sobre o geotêxtil e sofre uma compactação leve; segue-se a aplicação de uma tensão de

compressão de até 1 MPa; a saturação da amostra se dá sob fluxo ascendente; o ensaio é realizado com gradiente constante (1,10 ou 40, conforme o caso).

Os solos ensaiados no programa da EPM foram siltes e areias finas uniformes, enquanto que, no programa da IRIGM as amostras eram sílica britada com características de solo pulverulento. Durante a realização dos programas de ensaios, manteve-se o controle da quantidade de solo que passou através do geotêxtil. Estes finos eram recuperados com filtro de papel e, após secagem, quantificados através de pesagem.

SATO, YOSHIDA e FUTAKI (1986)

O objetivo do estudo foi examinar a existência do pré-filtro e verificar a influência que a condição seca do geotêxtil, no início da filtração, pode representar na sua capacidade de drenagem.

Os solos ensaiados são basicamente areno-siltosos e arenosos. Os geotêxteis submetidos aos ensaios de filtração são não-tecidos, agulhados e constituídos de filamentos contínuos.

O permeâmetro utilizado é basicamente um consolidômetro capaz de aplicar um elevado carregamento estático, de forma constante, por longo período de tempo.

Nos ensaios nos quais investigou-se a formação do pré-filtro, foram adotados os seguintes procedimentos: oito lâminas de geotêxtil e solo foram posicionadas no interior da célula com a umidade do limite de liquidez do solo, depois que a amostra foi então consolidada na tensão normal

de 39,22 KPa, tensão esta mantida durante todo o ensaio. O fluxo d'água durante o ensaio deu-se do topo para a base do permeâmetro sob etapas de gradientes hidráulicos constantes que variaram entre 10 e 100. O ensaio com gradiente mais elevado foi mantido durante três meses.

Os ensaios para verificação da influência da não saturação do geotêxtil na capacidade de drenagem de um sistema solo-geotêxtil foram conduzidos da seguinte forma. Três lâminas de geotêxtil em conjunto com solo compactado foram posicionados no permeâmetro. Inseriu-se uma grelha de argila, entremeada as lâminas de geotêxtil, na espessura de 0,55 mm. O gradiente hidráulico empregado nos ensaios foi 6.

Os ensaios de filtração em laboratório permitiram concluir que: (a) a vazão diminui e a formação do pré-filtro no solo foi indiretamente confirmada através de análises granulométricas; (b) a capacidade de drenagem é significativamente afetada pelo geotêxtil seco no início do ensaio.

Constou também desta pesquisa um estudo do comportamento do geotêxtil no campo. O acompanhamento de campo foi efetuado por dois anos. O geotêxtil em questão foi empregado como dreno de um muro de arrimo. O material de reaterro, posicionado por de trás do muro, era arenoso. Para a obtenção de dados sobre a composição do solo e do geotêxtil foi amostrado um bloco do conjunto utilizando-se a técnica de congelamento. Os estudos de campo não revelaram a existência de pré-filtro no solo arenoso do reaterro.

MERWE e HORAK (1989)

Esta pesquisa faz uma investigação para avaliar o comportamento de longo prazo do sistema solo-geotêxtil. Os trabalhos incluíram estudos em laboratório e no campo. Nos estudos em laboratório foram ensaiadas 85 combinações de solo/geotêxtil. Nos estudos de campo monitorou-se um dispositivo de drenagem subsuperficial instalado numa rodovia durante o período de dois anos e meio.

Trinta permeâmetros foram utilizados nos estudos em laboratório. O sistema de alimentação d'água permite a realização de ensaios de carga constante e que cada permeâmetro seja utilizado de forma independente dos demais. O permeâmetro empregado trata-se de uma coluna de filtração ($\phi = 90$ mm, $h = 300$ mm) em material transparente preparada para receber o geotêxtil à altura de 100 mm da base. O geotêxtil apoia-se sobre uma malha de 3,0 mm de abertura. O permeâmetro descrito tem a possibilidade de medir somente a permeabilidade do sistema solo-geotêxtil.

A água utilizada nos ensaios foi fornecida por um poço. As amostras de solo ensaiadas foram posicionadas no interior do permeâmetro sob três diferentes condições: secas e não compactadas; na umidade ótima e não compactadas; na umidade ótima e compactadas. Os gradientes hidráulicos utilizados foram 5,7 e 10. A duração de cada ensaio foi de cerca de 1600 horas.

Em alguns dos ensaios, em caráter experimental, utilizou-se uma malha de bronze no topo do permeâmetro a fim de homogeneizar o fluxo d'água na entrada e garantir a

manutenção da superfície do solo nivelada. A malha de bronze não foi suficiente para impedir a irregularização da superfície do solo. Foi então introduzido um prato circular pequeno de ferro galvanizado abaixo da malha de bronze. Durante os ensaios, constatou-se a formação de um depósito sobre a superfície da amostra de solo, provavelmente oriundo de reações eletrolíticas entre o bronze e o ferro galvanizado. O sistema por inteiro foi virtualmente colmatado após 200 horas de ensaio. Posteriormente, alguns outros ensaios foram feitos utilizando um geotêxtil fino sobre a superfície do solo, este arranjo mostrou-se eficaz na proteção da superfície do solo.

Nos ensaios de filtração realizados pode verificar-se que:

- as forças de percolação foram capazes de levar o solo a uma compacidade correspondente a 80% do AASHTO modificado. Já nos solos muito argilosos as forças de percolação induziram uma compacidade correspondente a 60% do AASHTO modificado;
- os fatores que mais significativamente influenciaram a permeabilidade do sistema solo-geotêxtil foram o gradiente hidráulico e a colmatção química.

Nas investigações de campo, verificou-se que o dispositivo de drenagem superficial apresentava uma vazão por unidade de área de 2100 vezes em média menor do que a do laboratório, para uma diferença de gradientes da ordem de 100 vezes menor entre o valor de campo relativamente ao de laboratório.

WILLIAMS e ABOUZAKHM (1989)

O trabalho aborda uma avaliação das características de filtração do sistema solo/geotêxtil usando a análise do "Hydraulic Conductivity Ratio" (HCR). A análise é realizada num dispositivo de permeabilidade que consiste de uma célula de ensaio triaxial modificada.

O método HCR procura simular as condições de campo. O corpo de prova para ensaio é moldado a partir de uma massa de solo compactada em laboratório ou de um bloco indeformado extraído no campo. A amostra de geotêxtil é posicionada no topo da amostra de solo, no interior da célula triaxial. O equipamento de ensaio permite controlar o sentido do fluxo d'água. A percolação de água no sentido topo-base, no início do ensaio, através das amostras de geotêxtil e de solo, possibilita a determinação da permeabilidade do solo, K_s , já que nesta altura do ensaio a influência do geotêxtil é nula. A determinação da permeabilidade do sistema solo-geotêxtil, K_{sg} , se faz ao final do ensaio de filtração.

A sequência de ensaio resume-se a: preparação do corpo de prova (solo-geotêxtil); saturação por contra pressão; consolidação; determinação da permeabilidade do solo, K_s ; determinação da permeabilidade do conjunto solo/geotêxtil, K_{sg} ; cálculo do HCR.

O HCR é um índice expresso pela razão permeabilidade do solo, K_s , sobre permeabilidade de equilíbrio do conjunto solo/geotêxtil, K_{sg} . Deste modo, se o valor do HCR é menor ou igual a 1 a performance do geotêxtil é satisfatória.

tória. No caso de $HCR > 1$ deve-se avaliar se o valor de K_{sg} obtido no ensaio ainda é compatível com o projeto.

O presente trabalho ainda faz uma análise crítica do método do "Gradient Ratio" e dos demais métodos que também usam uma coluna de filtração para avaliar a performance do sistema solo-geotêxtil. Esta análise consiste da listagem das vantagens e desvantagens das técnicas que empregam colunas de filtração.

VANTAGENS:

- (1) os ensaios usam equipamentos extremamente simples que podem ser facilmente fabricados;
- (2) gradientes hidráulicos muito baixos podem ser aplicados simulando condições de fluxo estático;
- (3) o equipamento é de baixo custo e durável;
- (4) a preparação da amostra, ou seja, o posicionamento do solo sobre o geotêxtil é simples;
- (5) a água percolada pode ser observada e coletada;
- (6) os finos que atravessam o geotêxtil podem ser coletados e pesados;
- (7) os procedimentos de ensaio são relativamente simples.

DESVANTAGENS:

- (1) não há controle sobre o estado de tensões atuante na amostra;
- (2) as amostras ensaiadas não são completamente saturadas devido à inexistência da saturação por contra-pressão;
- (3) o equipamento não é apto para a condição de fluxo bi-

dimensional;

- (4) solos plásticos e coesivos podem sofrer contração, inchamento, ou consolidação local. Isto pode resultar em espaços vazios entre a amostra de solo e a parede do cilindro, criando caminhos de resistência mínima através dos quais fluxos preferenciais podem surgir;
- (5) o posicionamento da amostra de solo não representa a condição de campo;
- (6) não há controle sobre o índice de vazios durante o ensaio.

QURESHI, KOGLER e BHATIA (1990)

O trabalho relata um estudo de filtração de solos com geotêxtil em que foram testados seis diferentes tipos de geotêxteis não-tecidos frente a 18 solos de graduação aberta.

O solo ensaiado foi a areia fina de Ottawa. Várias percentagens de partículas do tamanho do silte foram misturadas à areia fina para formar solos de graduação aberta. As partículas de silte foram obtidas a partir do processamento de uma sílica de alta pureza. O material assim obtido tem a vantagem de ser completamente inerte e não apresentar coesão.

A água da torneira deaerada (3.9 ppm de oxigênio dissolvido) foi utilizada nos ensaios. Adicionou-se cloro à água para reduzir a influência de bactérias na colmatção dos geotêxteis.

O permeâmetro empregado nos ensaios é o da Escola Politécnica de Montreal (EPM).

As amostras de solo usadas nos ensaios foram preparadas misturando-se água deaerada em volume igual ao de solo até formar uma lama. Após obtenção de uma mistura homogênea, a lama foi posicionada sobre o geotêxtil, já instalado no permeâmetro. A água foi introduzida no permeâmetro por chuveiramento para não desalojar as partículas de solo. A duração dos ensaios alcançou as duzentas horas. Ao final, as amostras de solo-geotêxtil foram extrudadas e impregnadas com epoxy de baixíssima viscosidade. As amostras encapsuladas foram cortadas e polidas para observação em microscópio a fim de estudar a colmatação da microestrutura do geotêxtil.

Todos os seis diferentes tipos de geotêxteis não tecidos estudados não permitiram perda de partículas de solo superior a 5% do peso total da amostra. Os geotêxteis mais finos, com massa por unidade de área menor mostraram menor capacidade de retenção do que aqueles de maior massa por unidade de área. As fotos obtidas através de microscópio revelaram que o silte não só diminui a permeabilidade do solo mas também reduz a permeabilidade do geotêxtil.

III.3 - EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO PARA OS ENSAIOS DE FILTRAÇÃO

O projeto do equipamento de filtração, apresentando a seguir, teve como premissas básicas: as pesquisas anteriores e o baixo custo de execução, visto a escassez dos recursos então disponíveis. O equipamento foi confeccionado com materiais inertes visando eliminar as possibilidades de eventuais interações de caráter físico-químico entre o equipamento e o solo.

III.3.1 - PERMEÂMETRO

a) PROJETO

O projeto do permeâmetro teve como referência a proposta de padronização da metodologia de ensaio de permeabilidade do sistema solo-geotêxtil apresentada em CHRISTOPHER E HOLTZ (1985) que estabelece o método intitulado "Gradient Ratio". A figura III.5 apresenta o permeâmetro desenvolvido. Este constitui-se de 6 peças: dois "caps"; duas câmaras; uma luva; e uma placa perfurada, cuja planta encontra-se na figura III.6. As setas indicadas na figura III.5 assinalam os espigões que fazem as entradas e saída d'água. Cada um dos sete espigões restantes é ligado a um piezômetro. Este conjunto de piezômetros permite a determinação simultânea da permeabilidade em quatro regiões ao longo da altura da amostra de solo. Estas permeabilidades referem-se às seguintes regiões: interface solo-geotêxtil; parte central do solo; parte superior do solo; e toda altura de solo. Nos primeiros ensaios o piezômetro instalado no "cap" superior não foi empregado, em seu lugar utilizou-se um suspiro.

O posicionamento da amostra de solo no interior do permeâmetro pode ser conduzido utilizando as seguintes técnicas: (a) derramamento de solo seco, com o emprego de um funil (CHRISTOPHER e HOLTZ, 1985) ou através da pluviação da amostra (técnica detalhada mais adiante); (b) derramamento de solo molhado, sob a forma de uma lama (QURESHI, 1990). Acredita-se que mais duas outras técnicas também poderiam ser consideradas.

Figura III.5 Corte do Permeâmetro Desenvolvido
DIMENSÕES EM MILÍMETROS ESC.: 1:1,25

FUROS :
(mm)



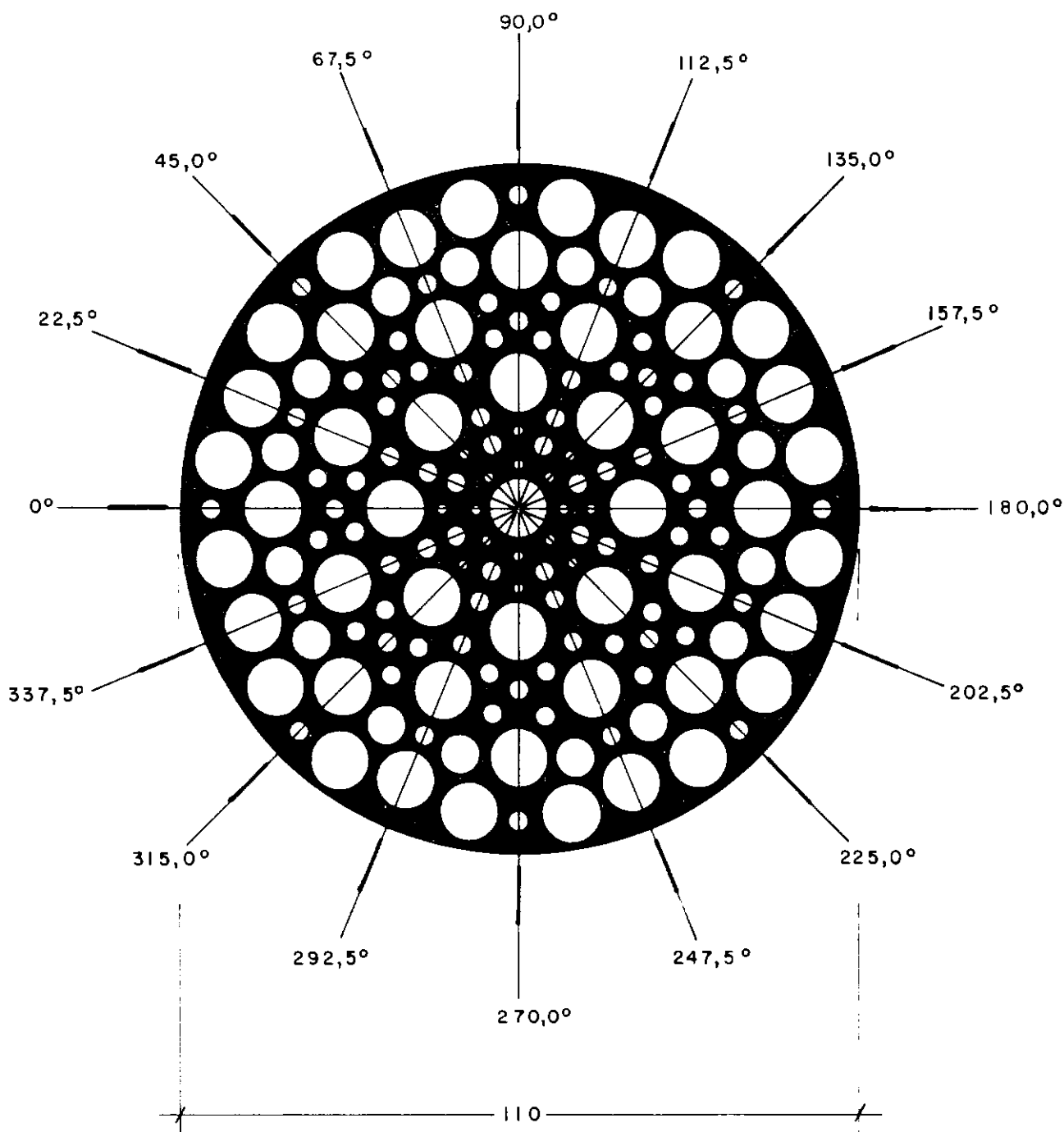
Ø = 9,50

Ø = 6,35



Ø = 3,20

Ø = 1,60



Nota : espessura da placa igual a 4mm.

Figura III.6 Planta da Placa Perfurada
DIMENSÕES EM MILÍMETROS ESC.: 1:1

Na primeira, a amostra seria compactada estática ou dinamicamente (método do Proctor Normal). Para tanto sugerem-se, no caso do permeâmetro utilizado, os seguintes cuidados:

- a parede interna do permeâmetro deveria ser protegida com resina epoxi, visto a baixa resistência do PVC, para evitar-se que durante a compactação o material mais granular induza a formação de sulcos na parede do permeâmetro. Tais sulcos poderiam tornar-se caminhos preferenciais para água nos ensaios subsequentes;
- o cintamento da câmara superior do permeâmetro com objetivo de reforçá-la de forma a suportar os esforços induzidos durante a compactação. A câmara superior foi concebida à semelhança do cilindro do Proctor Normal, no que se refere às dimensões, assim como no detalhe do dente necessário a receber o cilindro de prolongamento para compactação.

Na segunda, o emprego de uma amostra indeformada extraída no campo. Para isto faz-se necessário o preenchimento do vazio entre a parede do permeâmetro e o solo com um material impermeável de modo a forçar que o fluxo preferencialmente ocorra através do solo. Cuidados devem ser tomados no sentido de manter os piezômetros desobstruídos e em contato com a amostra de solo.

O projeto do permeâmetro possibilita também a utilização de um filtro natural. No caso, dispensa-se o uso da placa perfurada e o filtro arenoso passa a preencher a câmara inferior inteiramente. De forma a evitar o carreamento do material do filtro é necessária a colocação de uma tela sobre a entrada do espigão de saída.

Quando o geotêxtil é empregado como filtro, a câmara inferior do permeâmetro está apta a guardar as partículas grosseiras que tenham atravessado o geotêxtil durante a filtração. O material acumulado na câmara inferior, ao final do ensaio, pode ser então quantificado.

b) MATERIAL

Na confecção do permeâmetro, foram aproveitadas peças produzidas pela indústria em PVC para canalizações da água. As peças originais foram cortadas nas dimensões adequadas ao projeto. Os tubos que formam as câmaras superior e inferior foram rosqueados nas extremidades. Os "caps" tiveram a sua curvatura externa desbastada para a colocação de dois espigões. Os espigões são de nylon e foram moldados no torno, a sua fixação no corpo do permeâmetro é feita através de rosca. A placa perfurada, figura III. 6, também é de PVC. As fotos III.1 e III.2 mostram os detalhes do permeâmetro.

A vedação para a água na junção das peças se faz com fita de teflon e anéis de borracha. Na ligação da luva com as duas câmaras, bem como na ligação dos espigões ao corpo do permeâmetro, emprega-se o teflon. No acoplamento dos "caps" utilizam-se anéis de borracha para impedir vazamentos.

Em um único caso, foi necessário, além do teflon, vaselina, de forma a garantir a vedação entre uma luva e a câmara.

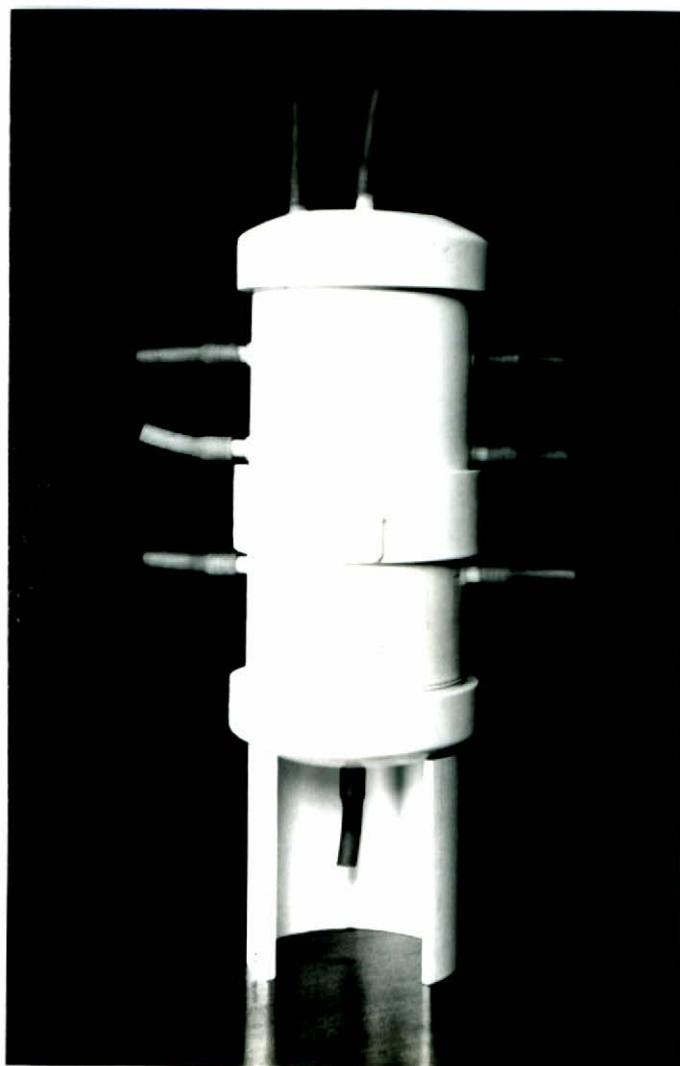


FOTO III.1 - Detalhe do Permeâmetro Desenvolvido

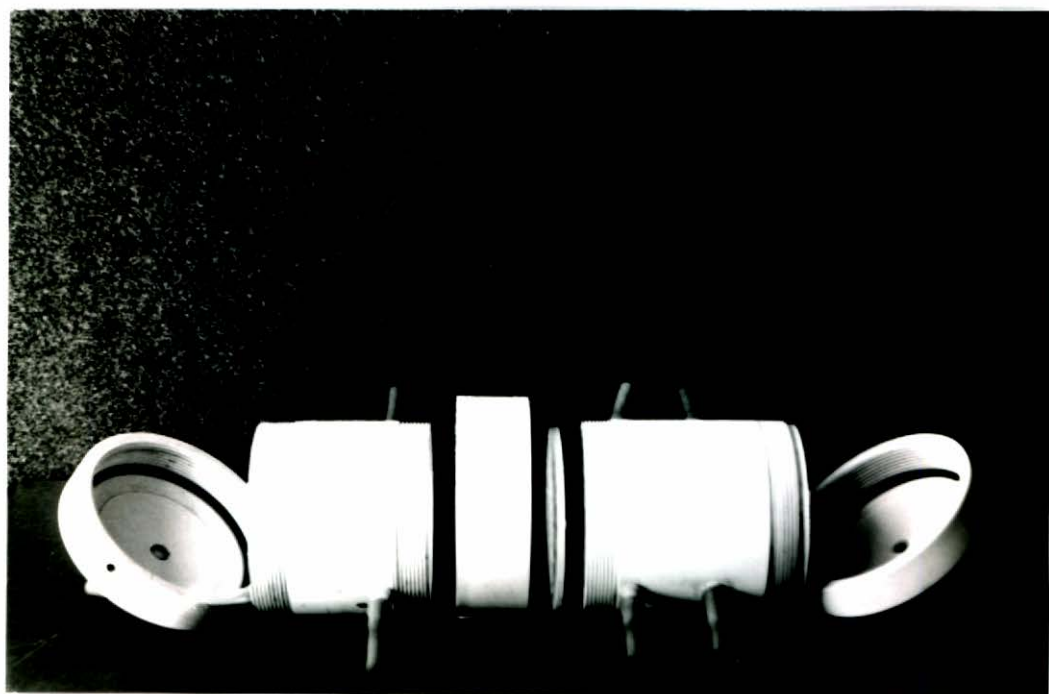


FOTO III.2 -Vista Explodida do Permeâmetro

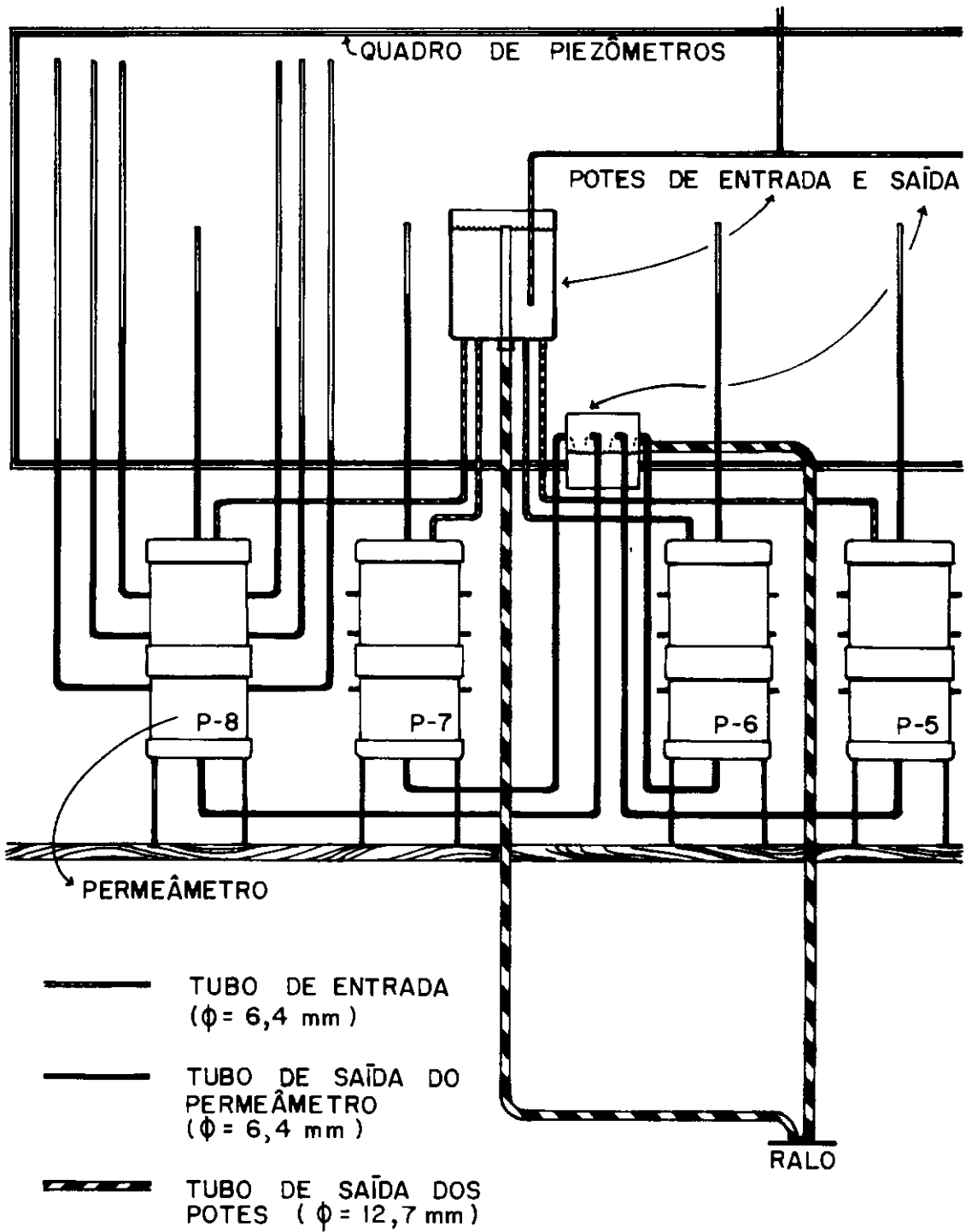


Figura III.7 Desenho Esquemático do Equipamento Desenvolvido

III.3.2 - EQUIPAMENTO DE FILTRAÇÃO

O equipamento desenvolvido consiste de: dois potes de entrada; dois potes de saída; oito permeâmetros; um quadro de piezômetros; e mais os tubos para circulação da água. A figura III.7 ilustra uma metade do equipamento.

A água previamente filtrada alcança os potes de entradas com a pressão existente na rede de distribuição. O nível d'água, no pote de entrada, fica limitado pela altura do ladrão que conduz o excesso de água para o ralo. O restante d'água alimenta os permeâmetros. A água, induzida pela diferença de altura entre os potes de entrada e saída, flui pelos permeâmetros até os potes de saída. A pressão da água no interior do permeâmetro é conhecida em três níveis, com 2 piezômetros em cada nível, e num nível com 1 piezômetro. Nos ensaios realizados, manteve-se sempre o pote de saída acima dos permeâmetros com objetivo de minimizar a presença de bolhas de ar no interior dos mesmos.

Os potes de entrada e saída são em PVC confeccionados a partir de peças fabricadas para instalações prediais. Os tubos de circulação de água e de piezometria são de nylon transparente com diâmetro de 6,4mm. A ligação dos tubos de circulação com os potes de entrada e saída realizou-se por intermédio de tubos de latex e peças de latão (conexões, espigões). O latex foi utilizado também na ligação dos tubos piezométricos com os espigões dos permeâmetros. Os tubos de saída dos potes são mangueiras plásticas de 12,7mm de diâmetro. A foto III.3 apresenta o equipamento de filtração em funcionamento.

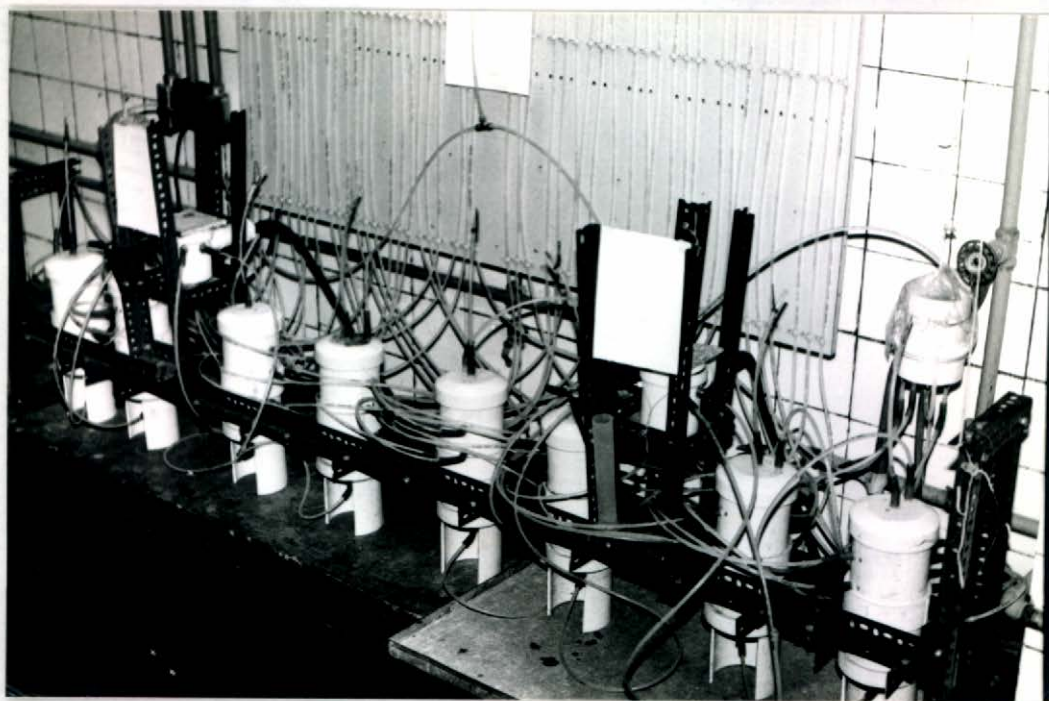


FOTO III.3 - Vista Geral do Equipamento de Filtração

III.4 - COMENTÁRIOS

Os equipamentos, objeto das pesquisas de filtração anteriormente mencionadas, podem ser grupados seguindo três tipos característicos: (a) os que se assemelham a uma coluna de filtração, que ainda podem ser subagrupados quanto ao aspecto de possuírem ou não uma câmara inferior; (b) os inspirados em consolidômetros; (c) e um único que empregue uma célula triaxial modificada. Cada um dos três grupos de equipamentos supracitados solicitam diversamente as amostras em estudo e conseqüentemente possibilitam, conforme discutido anteriormente, formas distintas de avaliação do comportamento do sistema solo-geotêxtil.

O equipamento para ensaio de filtração especificamente desenvolvido para esta tese é do tipo coluna de filtração com câmara inferior. A escolha deste tipo de equipamento foi motivada por seu baixo custo e versatilidade.

As pesquisas de filtração abordadas anteriormente têm como características em comum os seguintes aspectos:

(a) os solos testados são arenosos, areno-siltosos ou misturas de areia e silte (solos de graduação aberta); (b) as amostras de solo são deformadas; (c) a água percolada nos ensaios dos trabalhos mais antigos era obtida diretamente da torneira enquanto que trabalhos mais recentes, com curta duração, mencionam o uso de água deaerada; (d) os gradientes hidráulicos adotados são elevados em comparação com os observados no campo.

Os seguintes aspectos e conclusões podem ser destacados com base nas pesquisas anteriores; (a) são comuns

reduções do valor da permeabilidade inicial na ordem de dez vezes (RYCROFT e JONES, 1982); (b) a natureza esporádica e variações inconsistentes dos resultados podem-se atribuir ao uso de água não deaerada e ao emprego de amostras de solo deformadas (RYCROFT e JONES, 1982); (c) mudanças significativas na percentagem de silte ocorreram até 6 mm acima do geotêxtil (HALIBURTON e WOOD, 1982); (d) forças de percolação durante o ensaio de filtração são capazes de levar no caso de solos com poucos finos, a uma compacidade correspondente a 80% do AASHTO modificado para gradiente hidráulico em torno de 10 (MERWE e HORAK, 1989).

CAPÍTULO IV

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

IV.1 - INTRODUÇÃO

Foram realizados três programas de ensaios de filtração. Cada programa foi montado com objetivos específicos, que serão detalhados mais à frente. No entanto, vale destacar que na montagem destes programas dois objetivos estiveram sempre presentes, a saber:

- desenvolver o equipamento de ensaio;
- aprimorar a sistemática de investigação do ensaio.

IV.2 - PROGRAMA DE ENSAIOS

Os três programas realizados apresentaram como característica em comum a mesma condição de fluxo, definida a partir de:

- um regime de fluxo permanente;
- fluxo unidirecional (uma imposição do equipamento) com sentido descendente.

IV.2.1 - PROGRAMA 1

Este programa visou verificar o grau de eficiência do equipamento desenvolvido, identificando possíveis falhas ou partes que pudessem merecer aprimoramento.

O programa foi formado com a montagem de uma bateria completa de permeâmetros, o que totaliza oito permeâ-

metros. Utilizou-se um único solo com quatro filtros, chamados de: Typar 3267; Propex 4004; Bidim OP-20; e papel filtro. Cada filtro teve o seu par (dois permeâmetros com filtros iguais), para possibilitar a observação da repetibilidade nos resultados obtidos. Para tanto foi estabelecido o mesmo gradiente hidráulico para todo o conjunto de permeâmetros.

O solo protegido pelos filtros citados foi a areia de São Francisco com graduação entre as peneiras 50 e 100. Realizou-se a escolha de um solo com estas características devido aos seguintes motivos:

- comportamento na filtração simplificado;
- disponibilidade de uma técnica de preparação para corpos de prova em areia com alto grau de reprodutibilidade, fruto de uma tese (OLIVEIRA, 1987) elaborada na COPPE.

O comportamento de filtração utilizando areias uniformes é mais simplificado devido ao alto grau de estabilidade interna das areias uniformes (KENNEY e LAU, 1985) e a ausência de partículas muito finas que poderiam, ao longo do tempo, diminuir tanto a permeabilidade junto ao geotêxtil como a do sistema solo-geotêxtil.

A opção pelos filtros empregados justifica-se pelos seguintes aspectos:

- o Propex e o Bidim são os únicos geotêxteis fabricados no país em larga escala, sendo que o primeiro apresenta somente um tipo de geotêxtil específico para filtração;
- o Typar, trazido do exterior, apresenta características de fabricação distintas dos dois anteriores, o que permitiu analisar o comportamento de mais uma opção de geotêxtil no ensaio de filtração;

- o filtro de papel por possuir uma permeabilidade muito inferior aos geotêxteis e ao próprio solo protegido estabelece uma situação extrema e diferente no ensaio, com relação às demais.

O valor adotado para o gradiente foi em torno de 0,45. Entendeu-se que este valor era razoável para gerar um fluxo de água cujo volume total ao final do ensaio permitisse fazer as observações inicialmente previstas.

IV.2.2 - PROGRAMA 2

O programa 2 teve a intenção de promover a escolha de um solo, entre dois, para ser testado no programa 3. Assim como, observar o comportamento do equipamento desenvolvido frente a solos com finos.

Neste programa preparou-se somente dois permeâmetros, cada um deles munido com um dos seguintes solos formados pela decomposição de rochas sedimentares: um solo da unidade cenozóica; e um solo oriundo do arenito caiuá. Estes solos foram protegidos por um mesmo filtro geotêxtil, o Bidim OP-20. Os dois permeâmetros sofreram gradientes hidráulicos idênticos ao longo do ensaio. E o valor do gradiente foi mantido em 1 no intervalo de tempo zero a 44 horas, em 2,5 no intervalo de 44 a 46 horas, e por fim, em 4 no intervalo de 46 a 190 horas (término do ensaio).

A preferência pelos solos ensaiados decorreu destes apresentarem algumas evidências de erodibilidade no campo, por exemplo:

- taludes de corte nos solos da unidade cenozóica, realizados para a abertura de uma ferrovia, sofreram erosão in-

terna com a consequente ruptura do maciço;

- os solos oriundos do arenito caiuá apresentam grande suscetibilidade à formação de vossorocas, fenômeno que reconhecidamente pode ter sua origem tanto na erosão superficial como na erosão interna.

A razão do uso do Bidim OP-20 como o geotêxtil do ensaio não foi determinada por motivo especial. Já a adoção de gradientes altos dentro de um tempo de duração de ensaio relativamente curto (190 horas) teve a intenção de acentuar os fenômenos envolvidos durante a filtração. Desse modo esperava-se explicitar as diferenças de comportamento dos dois solos à filtração.

IV.2.3 - PROGRAMA 3

Neste programa voltou-se a utilizar o conjunto completo dos oito permeâmetros. O objetivo foi implementar um ensaio de longa duração visando verificar a performance dos filtros geotêxteis, no que se refere à capacidade de retenção de finos e à variação da permeabilidade com o tempo. Fixou-se para o ensaio um gradiente hidráulico relativamente baixo, no valor de 1, mais próximo aos verificados no campo. O escopo do programa 3 de forma similar ao programa 1 foi estruturado com:

- um único solo (solo do arenito caiuá);
- quatro filtros, três de geotêxteis (Tygar 3267, Propex 4004, Bidim OP-20), um filtro natural (areia média de Itaipuaçu);
- dois ensaios para cada tipo de filtro, a fim de observar a repetibilidade de resultados;

- o mesmo gradiente para o conjunto dos oito permeâmetros.

A introdução de um filtro natural neste programa foi motivada pelo seu comportamento de filtração universalmente mais conhecido comparativamente aos filtros sintéticos. O comportamento do filtro de areia pode ser considerado como referência na análise e interpretação dos resultados obtidos nos ensaios com geotêxteis.

IV.3 - DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS ENSAIADOS

As descrições dos materiais submetidos aos ensaios de filtração estão apoiadas, no caso dos:

- filtros de geotêxtil, nos dados fornecidos nos guias de seleção dos fabricantes;
- filtro de papel, nos dados de BISHOP e HENKEL (1962);
- filtro de areia, ensaios realizados na COPPE;
- solos protegidos;
 - areia de São Francisco, dados de OLIVEIRA FQ (1987) e ensaios realizados na COPPE;
 - solo da unidade Cenozóica, dados do Relatório Final da Ligação Ferroviária Celso Bueno-Araguari, Subtrecho "A" (1980), dados de ensaios e análises realizadas na COPPE.
 - solo de arenito caiuá, dados de ensaios e análises realizadas na COPPE.

IV.3.1 - FILTROS

Apresenta-se, a seguir, dados gerais dos filtros de geotêxteis que figuraram neste trabalho.

Tipo de Geotêxtil	Fabricante	Polímero	Classificação q/a estrutura	Ligação das fibras
Typar 3267	Dupont	polipropileno	não tecido	termo-ligada
Propex 4004	Propex do Brasil Ltda.	polipropileno	tecido	-
Bidim OP-20	Rhodia S.A.	poliéster	não tecido	agulhada

As fotos IV.1, IV.2, IV.3 exibem amostras dos geotêxteis indicados anteriormente.

Reúne-se, a seguir, dados específicos para os filtros estudados.

Filtro	Espessura (mm)	Permeabilidade (10^{-4} m/s)	Abertura de Filtração (Micra)
Typar 3267	0,41	13(2KPa), 7(200KPa)	$D_w=240, D_{95}=250$
Propex 4004	0,40	640	$EOS=30/10, D_{95}=400(*)$
Bidim OP-20	2,9	22	$D_{95}=130$
Papel Filtro	0,15	0,002	-
Areia média de Itaipuaçu	-	20	$D_{10}=750$

(*) Segundo VIDAL E RIGHETTI (1990)

A areia de Itaipuaçu que é oriunda de uma praia, situada no Município de Maricá-RJ. É formada por grãos de quartzo, subarredondados, coloração clara. A sua densidade dos grãos tem o valor de 2,647. Sua curva granulométrica está indicada na figura IV.1

IV.3.2 - SOLOS

Discorre-se, adiante, sobre os solos protegidos, no que se referem aos locais de amostragem, assim como, respectivas geologias.

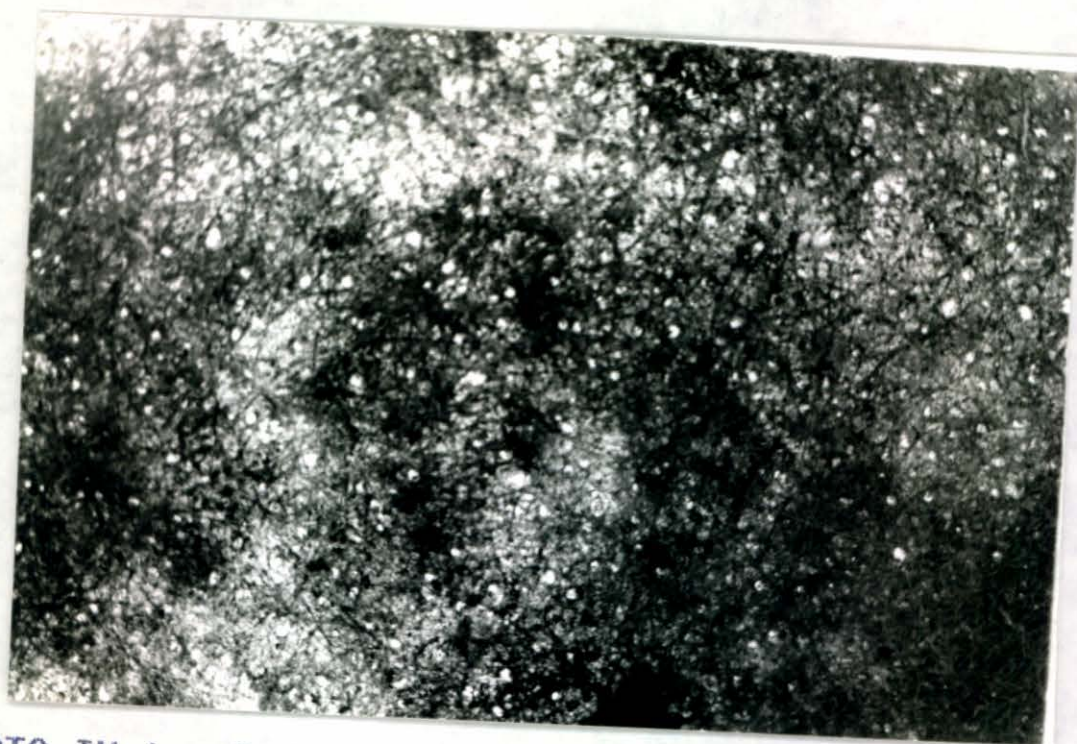


FOTO IV.1 - Typar 3267 Contra a Luz

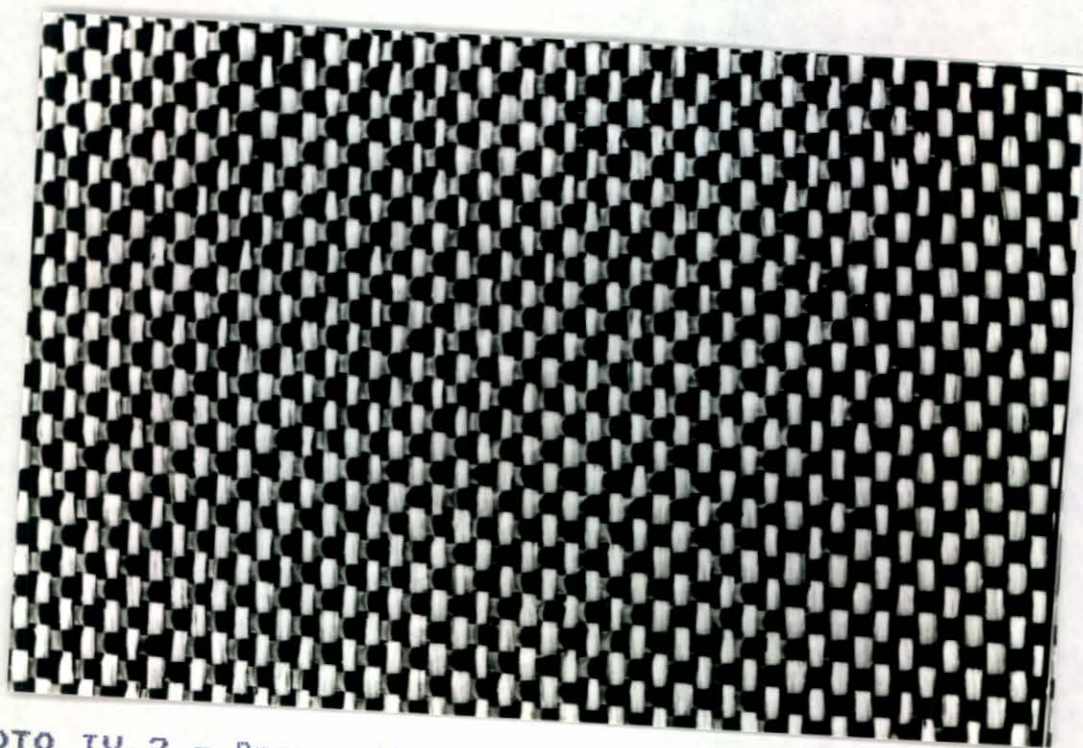


FOTO IV.2 - Propex 4004, Geotêxtil Tecido com Laminetes (urdume) e Fibras Fibrilizadas (trama)

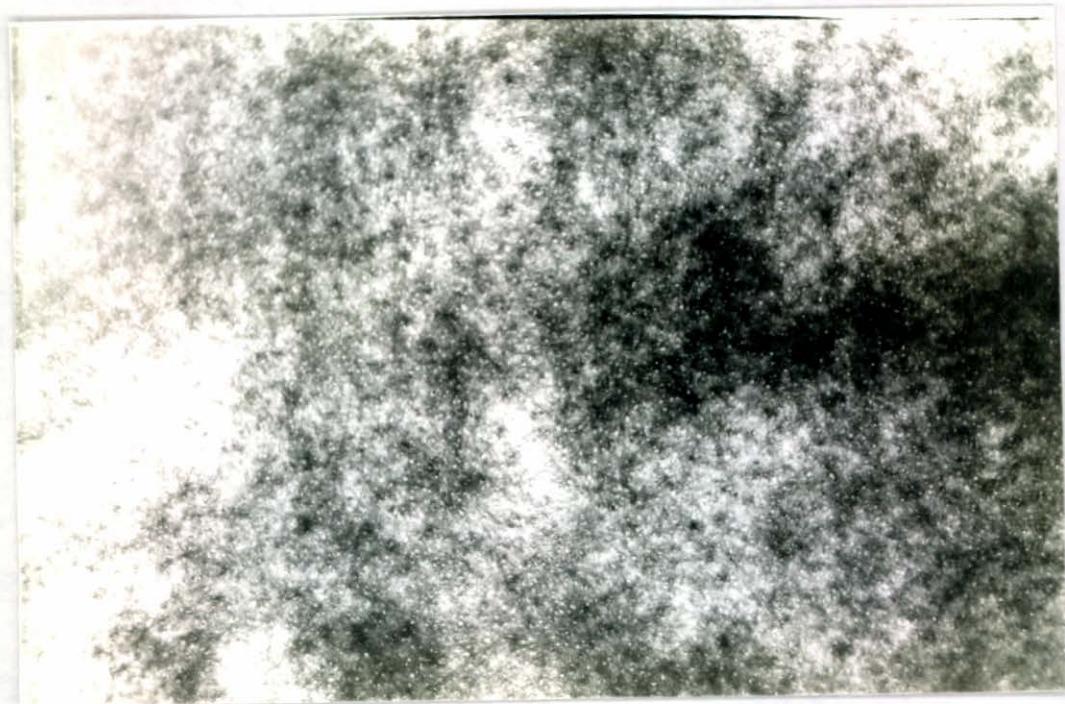


FOTO IV.3 - Bidim OP-20 Contra a Luz

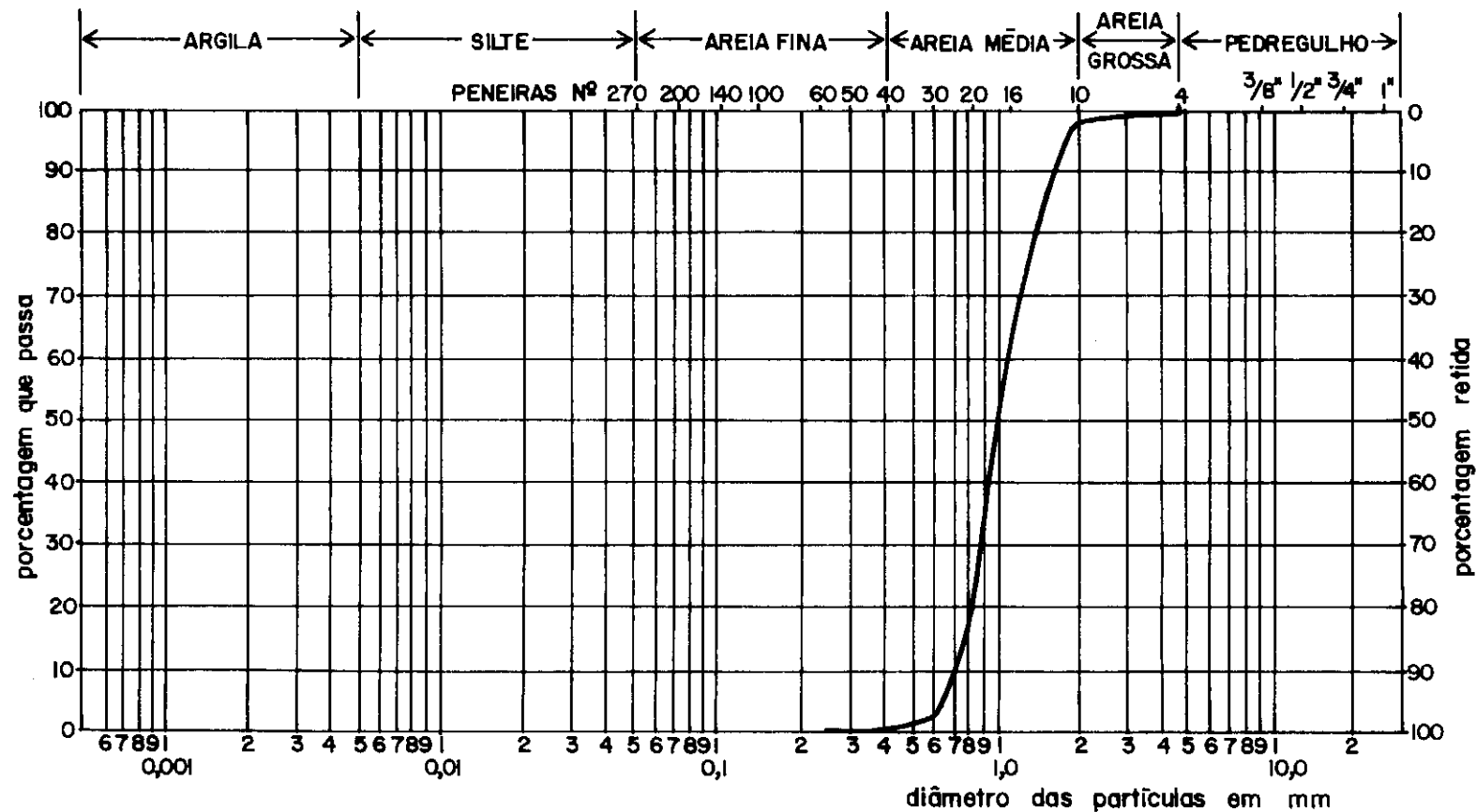


Figura IV.1 Curva Granulométrica da Areia Média de Itaipuaçu

A areia de São Francisco é oriunda da praia do Saco de São Francisco, na cidade de Niterói-RJ. Teve sua formação a partir da desagregação do gnaíse, rocha predominante na região. É constituída basicamente por grãos de quartzo do tipo incolor, branco leitoso, amarelo. Nota-se a presença de mica biotita sob a forma de lamelas pretas. A forma predominante dos grãos varia de subarredondada a subangular (OLIVEIRA FQ, 1987). A coleta da areia ocorreu sobre a calçada com objetivo de amostrar um material mais fino, previamente selecionado pelo vento.

Outro solo incluído nos ensaios de filtração foi o solo da unidade cenozóica. São solos desenvolvidos a partir do terciário, sob condições de clima semi-árido, com alternâncias bem definidas de estações secas prolongadas, com estações úmidas. Durante as estações úmidas ocorreu processo pedológico que levou ao desenvolvimento de solos laterizados e até mesmo crostas ferro-alíticas (lateritas).

A coleta do solo da unidade cenozóica teve lugar ao longo da Ligação Ferroviária Celso Bueno-Araguari, da RFFSA, Km 950,670 da estrada ou Subtrecho A de projeto, estaca 690.

O terceiro solo a compor os programas de ensaio foi o solo do arenito caiuá que recobre amplas áreas no noroeste do Paraná, sudeste do Mato Grosso do Sul e oeste de São Paulo. Faz parte da unidade caiuá do período cretáceo, que está acima dos basaltos, e constitui-se de arenitos finos a médios, róseos, avermelhados, arroxeados com abundante estratificação cruzada. São arenitos friáveis, com grãos arredondados recobertos por películas de óxido de ferro.

Sabe-se da ocorrência de camadas argilosas de até 1,5 m de espessura, intercalada na massa arenítica.

A coleta do solo do arenito caiué foi localizada no Km 420 da Ligação Ferroviária Cianorte-Maringá, da RFFSA.

De forma a possibilitar um entendimento do comportamento físico-químico dos solos com finos, submetidos ao ensaio de filtração, realizou-se uma análise química e mineralógica nos mencionados solos. Tal análise inclui: o ataque sulfúrico à porção do solo que passou na peneira 10; determinação da quantidade de massa perdida pelo solo quando este é aquecido à mufa; determinação do pH do solo por dois métodos; cálculo do $(pH)_0$ que define o nível de pH em que o solo tem carga elétrica líquida zero. No $(pH)_0$ o solo tem o seu maior grau de estabilidade físico-química. Apresenta-se, a seguir, os resultados obtidos na análise.

Análises	Solo Cenozóico	Solo Caiué
perda ao fogo (1000°)	3,00%	3,08%
pH (H ₂ O)	4,90	4,10
pH (KCL)	6,00	4,36
$(pH)_0$ calc.	7,10	4,62
<hr/>		
SiO ₂	2,3%	6,9%
Al ₂ O ₃	3,4	6,8
Fe ₂ O ₃	1,78%	4,85%
TiO ₂	0,29%	0,50%
Resíduo	90,07%	78,53%
Total	100,84%	100,66%

O Ki e Kr dos solos analisados, mostrados a seguir, refletem o grau de alteração geoquímica dos solos.

Análises	Solo Cenozóico	Solo Caiuá
Ki	1,15	1,72
Kr	0,86	1,18

De posse dos percentuais dos óxidos presentes nos solos foi possível estabelecer as composições mineralógicas dos mesmos, indicadas a seguir.

Mineralogia	Solo Cenozóico	Solo Caiuá
Caulinita	5%	15%
Gibbsita	2%	1%
Goetita	2,5%	6,5%
TiO ₂	0,3%	0,5%
Quartzo	90%	78,5%

A partir das análises químicas e mineralógicas realizadas, pode afirmar-se:

- a quantidade de matéria orgânica e água nos solos são pequenas, bem como os teores de sílica e alumina combinada, ferro e titânio;
- os solos são ácidos;
- os valores de $(pH)_e$ calculados indicam que o solo caiuá é o mais estável físico-quimicamente, já que o seu $pH(H_2O)$ está muito próximo do seu $pH(KCl)$, ou seja, $(pH)_e$ próximo $pH(H_2O)$. Dá-se o contrário com o solo cenozóico, que por possuir $pH(H_2O)$ abaixo do $(pH)_e$ tem carga líquida positiva, o que enseja uma repulsão entre partículas com carga positiva.
- quanto ao argilo-mineral, o que predomina é a caolinita;

- quanto ao estado de alteração, são relativamente pouco alterados, sendo que o solo cenozóico é mais alterado que o solo caiuá.

As características geotécnicas dos solos protegidos nos ensaios de filtração são mostradas a seguir.

Parâmetros Físicos	Areia de São Francisco (peneiras 50 a 100)
Densidade dos Grãos	2,64
e min	0,62 (uso de vibrador de peneiras)
e max	0,80 (método KOLBUSZEWSKI)

Parâmetros Físicos	Solo Cenozóico	Solo Caiuá
.Densidade dos grãos	2,66	2,67
.e min (Proctor Normal)	0,38	0,30
.Limite de Liquidez (%)	-	20
.Índice de Plasticidade (%)	Não Plástico	7
.Peso Específico Aparente "In Situ" (KN/m ³)	18,97	-
.Umidade "In Situ" (%)	8,3	-
.Peso Específico Aparente Seco Máximo (KN/m ³)	19,30	20,5
.Umidade ótima (%)	9,9	9,35

A energia empregada no ensaio de compactação foi a normal.

Da figura IV.2, que reúne as curvas granulométricas dos três solos pesquisados, retirou-se os dados apresentados a seguir.

Solos Protegidos	Granulometria				CU	D _{es} (micra)
	Argila %	Silte %	Areia Fina %	Areia Média %		
Areia S.Francisco (#50-100)	-	-	100	-	1,53	290
Solo Cenozóico	8	4	78	10	13,85	340
Solo Caiuá	20	2	76	2	-	190

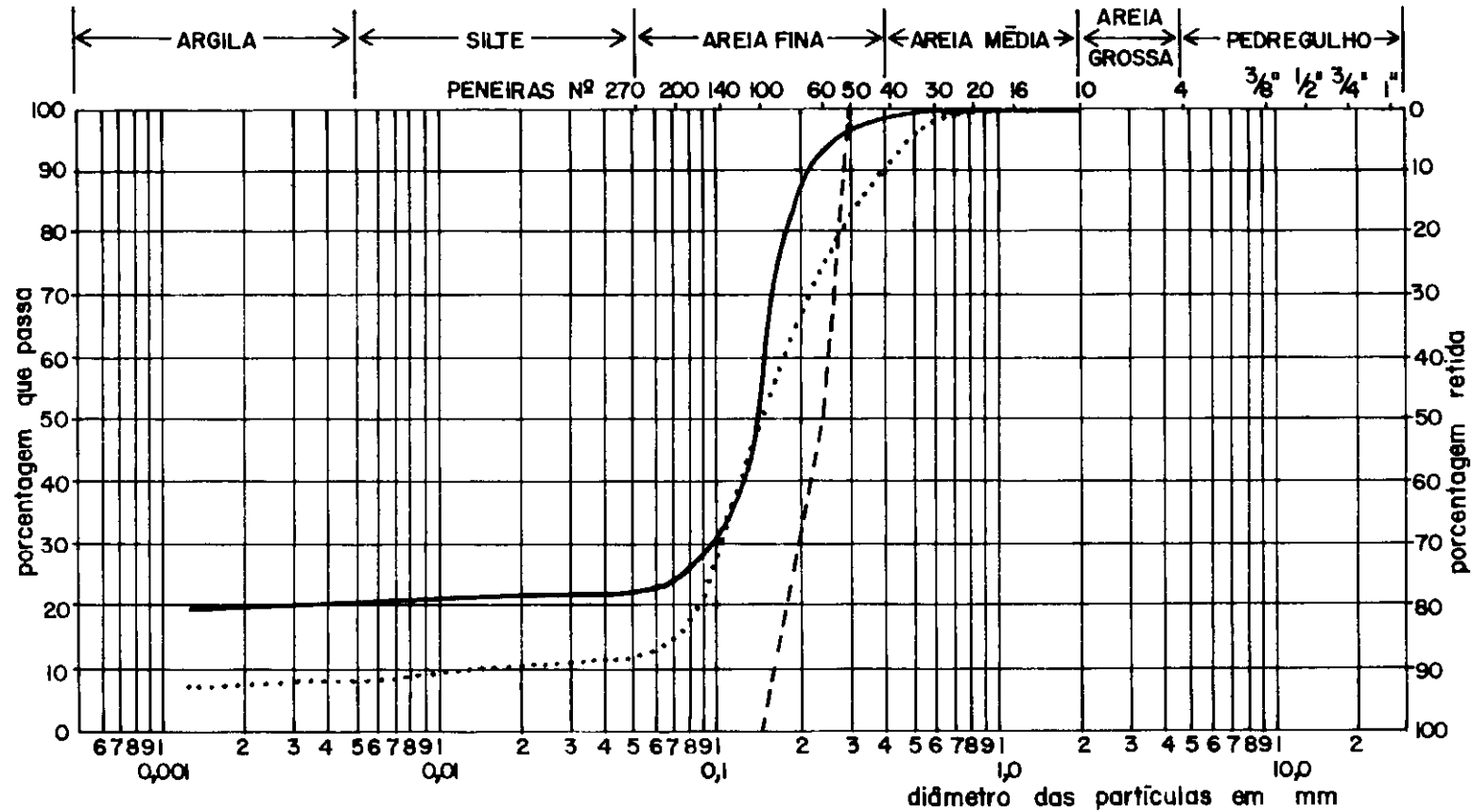
Nota: Solo Caiuá $CU' = \frac{D_{60}}{D_{20}} = 75$

IV.4 - PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Para a realização dos ensaios de filtração foram empregadas metodologias específicas que envolveram basicamente os quatro elementos utilizados: a água, os filtros, os solos protegidos e o equipamento de ensaio.

IV.4.1 - ÁGUA

A água usada nos ensaios proveio da rede pública. No entanto, antes de alcançar os potes de entrada do equipamento de filtração ela foi purificada em dois filtros. O primeiro, promove a remoção das partículas grosseiras (filtro de areia). O segundo, possibilitou o bloqueio das partículas coloidais presentes na água (filtro de carvão).



.....SOLO DA UNIDADE CENOZÓICA ———SOLO DO ARENITO CAIUÃ -----AREIA DE S. FRANCISCO
(# 50-100)

Figura IV.2 Curva Granulométrica dos Solos Protegidos

De modo a monitorar a qualidade da água realizaram-se verificações do pH, condutância elétrica específica ⁽¹⁾ e turbidimetria ⁽²⁾.

Estes controles foram empregados no programa 2 parcialmente e no programa 3 integralmente. Todas as três medições são obtidas através de equipamentos específicos, que fornecem resultados diretos. A turbidimetria é apresentada em FTU (fator turbidimétrico universal).

Com objetivo de correlacionar os resultados da turbidimetria em FTU com a massa de partículas de solo em suspensão estabeleceu-se, para o arenito caiuá, um gráfico com a relação FTU versus a concentração de partículas em suspensão (mg/l), utilizando-se o procedimento descrito a seguir. Fez-se a diluição em água de uma massa conhecida da fração argila do solo caiuá. Para então, promover-se diluições sucessivas até obter-se suspensões coloidais cujas leituras de turbidimetria fossem próximas das amostras d'água colhidas dos permeâmetros. Daí, foi possível definir a correlação apresentada na figura IV.3

IV.4.2 - FILTROS

As amostras de geotêxteis utilizadas nos ensaios foram escolhidas de forma a serem representativas das peças de origem. Juntamente com o papel filtro, as amostras anteriores foram preparadas com o diâmetro interno da luva de ligação das duas câmaras do permeâmetro. A colocação das

⁽¹⁾ A condutância elétrica específica exprime a capacidade d'água conduzir corrente elétrica. Para ter-se uma idéia de valores de condutância específica: a água ultra pura é 0,055 microsiemens/cm; a água deionizada é 1,4 microsiemens/cm; e a água da torneira é 77 microsiemens/cm.

⁽²⁾ A turbidimetria mede a turbidez da água provocada pela presença de partículas coloidais.

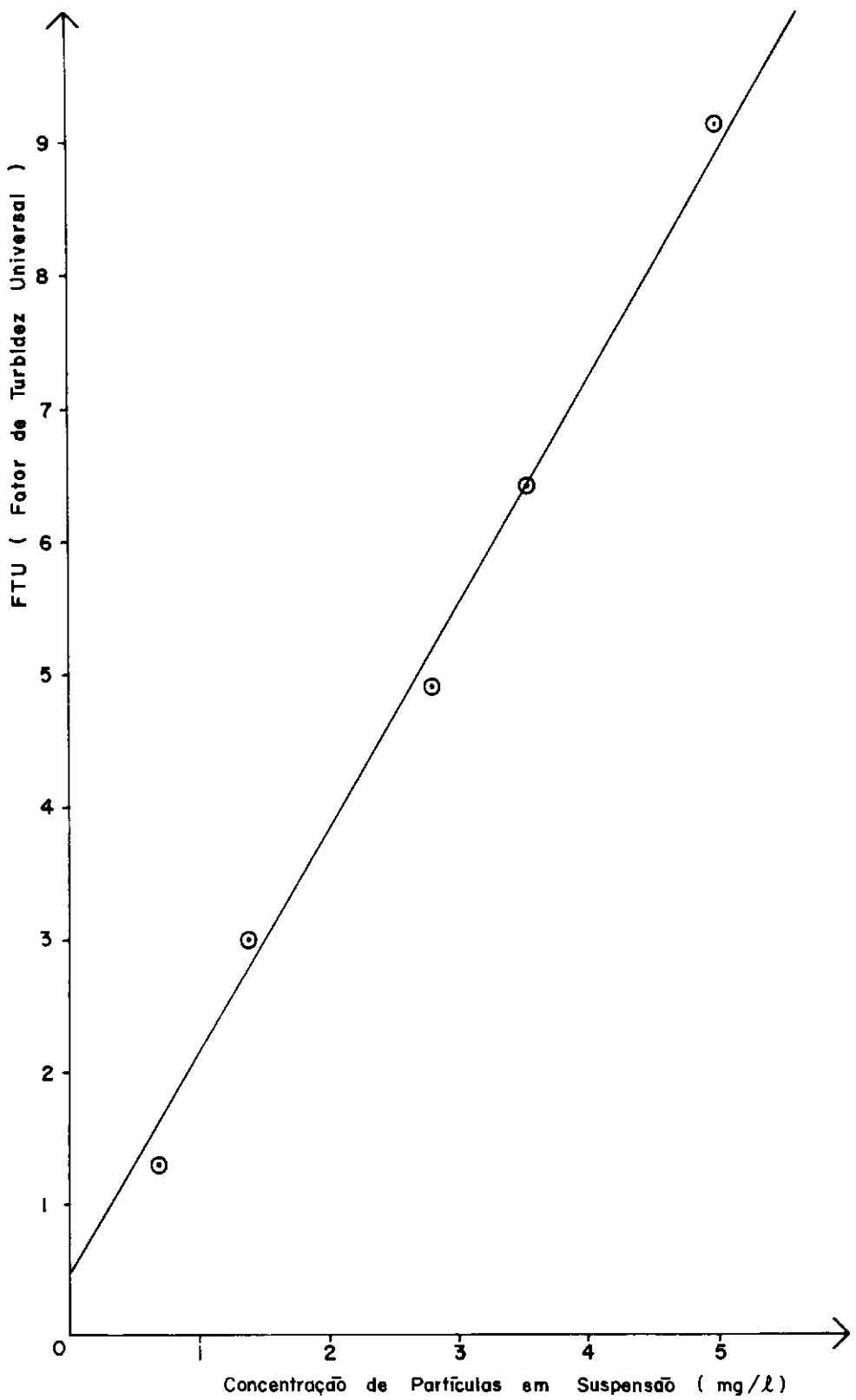


Figura IV.3 Correlação FTU x mg / l para a Fração Argila do Solo Caiuã

mesmas nos permeâmetros se faz na seguinte ordem:

- encosta-se a amostra no interior da luva que já está enroscada na câmara superior;
- coloca-se a placa perfurada em contato com a amostra;
- enrosca-se a câmara inferior na luva até que a amostra de filtro seja pressionada pelas paredes do permeâmetro. O procedimento descrito mostrou-se eficaz por que a peça que está sendo apertada, a câmara inferior, não tem contato com a amostra de filtro e sim com a placa perfurada. Isto permite que o filtro de geotêxtil ou papel não sejam deslocados da posição correta.

A areia de Itaipuaçu que foi utilizada como filtro natural no programa 3 sofreu previamente lavagem e secagem em estufa. Depois foi colocada na câmara inferior do permeâmetro pelo processo de pluviação. Tal recurso de preparação de amostras de areia para corpos de prova de ensaios triaxiais foi aplicado por OLIVEIRA (1987). A pluviação permite que se obtenha amostras com excelente repetibilidade, assim como, com alta compacidade.

IV.4.3 - SOLOS PROTEGIDOS

A areia de São Francisco, empregada no programa 1 como solo protegido, inicialmente passou por lavagem e secagem em estufa. A seguir, foi peneirada para fazer-se a seleção da fração que passa na peneira nº 50 e fica retida na peneira nº 100. Somente esta fração selecionada da areia de São Francisco foi utilizada nos ensaios. A utilização de pluviação no preparo das amostras possibilitou a obtenção de boa uniformidade e alta compacidade para o solo protegi-

do, nos ensaios de P-1 a P-8.

Os solos cenozóico e cauiá empregados nos programas de filtração 2 e 3 foram levados primeiramente à estufa para secar. A seguir foram destorroados e passados na peneira nº 10.

No preparo das amostras de solo utilizou-se também a pluviação. Esta técnica foi desenvolvida originalmente para areias puras. Assim que, de forma a permitir o emprego da técnica aos referidos solos, que não são essencialmente arenosos, foi necessário fazer-se uma pequena alteração no procedimento original. Este prevê o chuveiramento através de uma série de peneiras. Para a areia de São Francisco a série é uma peneira nº 10 e seis peneiras nº 4. No caso dos programas 2 e 3 utilizou-se a série com sete peneiras nº 4.

Com o objetivo de verificar a adequação da técnica alguns testes foram efetuados antes do preparo das amostras dos ensaios de filtração. Constatou-se que a repetibilidade das amostras obtidas era bastante satisfatória em termos de peso específico. Ainda verificou-se que não só não havia segregação de partículas mas também existia uma perfeita uniformidade ao longo da vertical e horizontal das amostras pluviadas. Nestes testes iniciais de pluviação foi utilizado um cilindro transparente, com dimensões da câmara do permeâmetro, que permitiu a visualização da homogeneidade da amostra. Ensaios granulométricos em porções de solo colhida na parte inferior e superior do cilindro demonstraram a uniformidade.

Dentro da investigação do uso da pluviação evidenciaram-se que os pesos específicos secos das amostras

pluviadas (arenito caiuá) eram baixos, em torno de 14 KN/m³, comparativamente ao ensaio de compactação Proctor Normal cujo peso específico seco máximo foi de 20,50 KN/m³. No entanto, como esta compacidade mais baixa representa uma situação mais crítica para os filtros em teste, sem afastar-se de uma compacidade possível numa situação real de campo, entendeu-se que seria adequada para os ensaios.

IV.4.4 - EQUIPAMENTO

Para barrar o acesso do solo aos tubos piezométricos, foi utilizado no programa 1 um segmento de 15mm de algodão aproximadamente preenchendo os espigões dos piezômetros. Nos programas 2 e 3 optou-se por fixar uma tela, malha 200, nas paredes internas dos permeâmetros. Para a fixação das telas, empregou-se fita adesiva tipo crepe, foto IV.4. Ainda no programa 3 foi necessário a proteção da tomada do tubo de saída nos ensaios que se usou filtro natural para evitar o carreamento de areia. Isto foi feito com duas camadas superpostas de tela de nylon malha de 1mm, também fixadas por fita crepe.

A mudança do uso do algodão para a tela na proteção das tomadas dos piezômetros foi ocasionada pelo fato de serem verificados, durante a realização do programa 1, alguns indícios que o algodão poderia falsear a leitura dos piezômetros. De forma a aclarar esta dúvida, empreendeu-se a seguinte simulação. Um tubo semelhante aos usados nos piezômetros disposto em forma de U com um segmento de 15mm de algodão em seu interior, preenchido com água por um dos

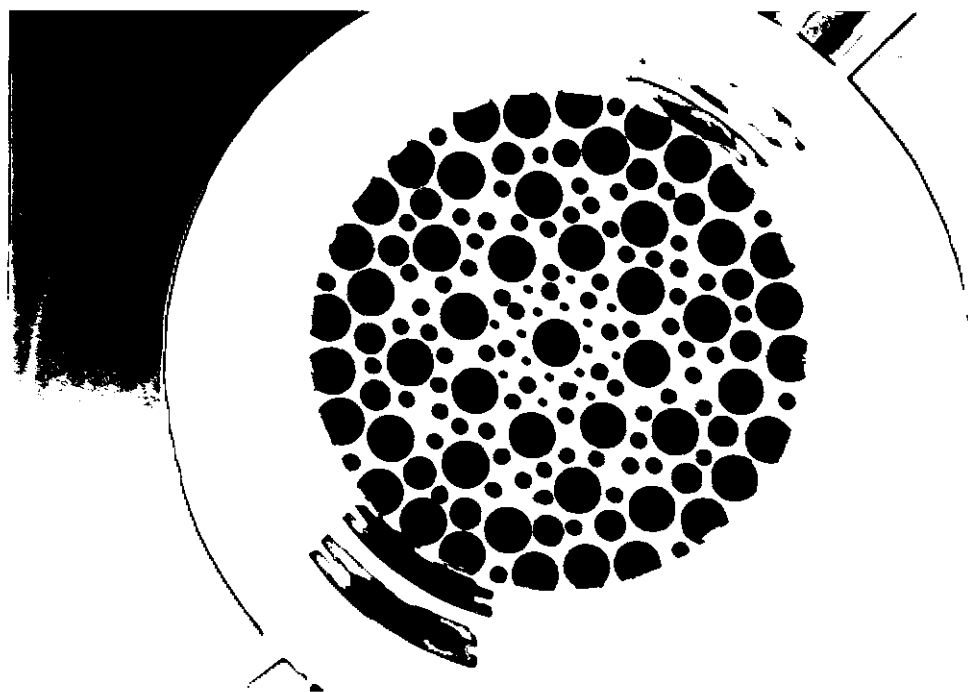


FOTO IV.4 - Detalhe da Proteção das Tomadas
dos Piezômetros

lados, mostrou inicialmente um desnível de 10 mm aproximadamente entre os níveis da superfície livre d'água nas extremidades. Ainda observou-se que o equilíbrio dos níveis d'água só viria ocorrer muitos dias após. No entanto acredita-se que este fato não acarretou prejuízo reais para os resultados obtidos no programa 1, já que os ensaios foram de longa duração (em torno de 30 dias), além de como perdas de cargas são grandezas relativas, os erros caso existam provavelmente devem se compensar.

No programa 1, onde o solo protegido foi areia, já iniciou-se o ensaio de filtração com fluxo descendente, devido a maior facilidade de saturação da amostra de solo. No programa 2 e 3 os ensaios começaram com o fluxo ascendente de água de modo a obter neste estágio do ensaio a maior expulsão de ar possível do interior do permeâmetro. No fluxo ascendente não se permitiu que a diferença de carga hidráulica entre interior e exterior do permeâmetro fosse maior que 25mm. O período de fluxo ascendente no programa 2 chegou a 6 horas e no programa 3 alcançou 120 horas. Neste mesmo programa 3 quando os permeâmetros já estavam montados, somente com os filtros posicionados, vasou-se água sobre estes até expulsar-se o maior volume de ar possível saturando as câmaras inferiores. Procedendo-se então a pluviação do solo. Este procedimento visou diminuir a quantidade de ar no interior da câmara do permeâmetro, facilitando a saturação do solo.

As leituras de vazão efetuadas no transcorrer dos ensaios sempre foram repetidas duas vezes de forma a utilizar-se o valor médio no cálculo da permeabilidade. A foto IV.5 mostra a realização de leitura de vazão. Para isto

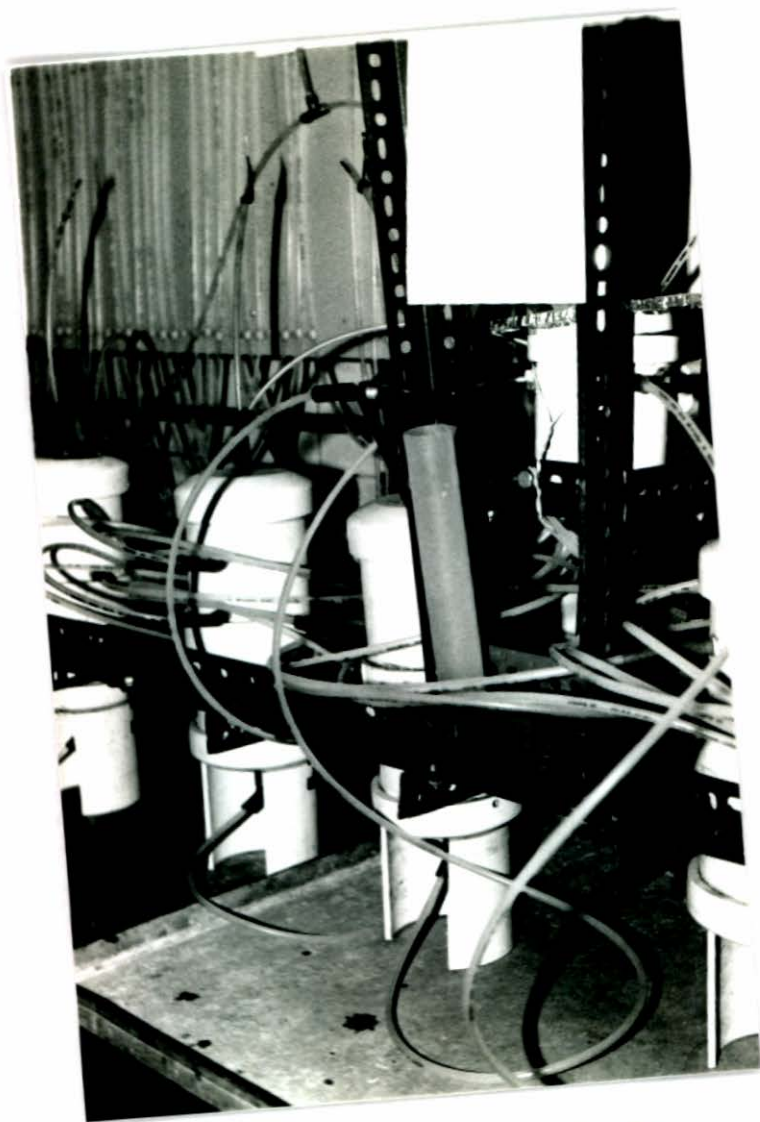


FOTO IV.5 - Detalhe da Leitura de Vazão

conecta-se o tubo de saída do permeâmetro num espigão posicionado na mesma altura do nível de saída. A água que pinga é captada por uma bureta onde é feita a leitura de volume, para um tempo específico. Simultaneamente com as medidas de vazão registraram-se as alturas piezométricas. Para tanto empregou-se régua metálica, tendo como referência de nível a base do quadro de piezômetros. Neste momento, também anotava-se a temperatura ambiente.

IV.5 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados serão apresentados e discutidos a partir de cada programa de ensaio realizado na forma de gráficos e comentários.

A discussão dos resultados de filtração será norteada basicamente objetivando:

- explicitar em que grau os objetivos específicos de cada programa foram alcançados;
- comparar resultados obtidos entre situações idênticas de ensaio, a fim de investigar a repetibilidade dos resultados;
- verificar se houve estabilização no processo de filtração, no que se refere, ao transporte de partículas e as permeabilidades relativas às várias camadas de solo ao longo do tempo;
- comparar os resultados obtidos com os critérios de projeto de um filtro de geotêxtil.

IV.5.1 - PROGRAMA 1

O programa 1, já descrito anteriormente, foi formado de acordo com os dados alinhados, a seguir.

Permeâmetro	P-1	P-2	P-3	P-4
Solo Protegido	Areia	de	São	Francisco
Filtro	Typar 3267	Propex 4004	Bidia OP-20	Papel Filtro
Gradiente Hidráulico	0,43	0,43	0,43	0,43

Permeâmetro	P-5	P-6	P-7	P-8
Solo Protegido	Areia	de	São	Francisco
Filtro	Typar 3267	Propex 4004	Bidia OP-20	Papel Filtro
Gradiente Hidráulico	0,44	0,44	0,44	0,44

IV.5.1.1 - EVENTOS REGISTRADOS

Foram anotados os fatos que chamaram a atenção durante a realização do ensaio.

Logo no primeiro dia de ensaio ocorreu a perda do P-4. Isto foi ocasionado por uma ação involuntária que provocou o desligamento do tubo na saída do permeâmetro. O conseqüente aumento do fluxo promoveu a ruptura imediata do filtro de papel. Então, o material que passou a fluir do permeâmetro era uma mistura de areia e água. A razão da ruptura foi o gradiente bem elevado que se instalou, a seguir do desligamento do tubo.

Após trasecorrer 47 horas os ensaios P-2 e P-3

apresentaram vazamentos. A localização do vazamento nos dois permeâmetros foi junto ao ponto de inserção do piezômetro E, ver figura IV.4. Os vazamentos eram da ordem de uma gota a cada 45 segundos para P-2 e 3,25 ml/min para P-3. De forma a corrigir este problema, interrompeu-se o fluxo para os dois permeâmetros, pelo nivelamento das extremidades de entrada e saída. O período de reparo envolveu 36 horas. Em sequência, o fluxo foi restabelecido não mostrando mais sinais de vazamento em P-2. No caso de P-3, apesar da vazão ter diminuído para 0,25 ml/min, o vazamento não foi debelado. No entanto, resolveu-se continuar o ensaio de P-3 medindo-se tanto a vazão do permeâmetro quanto a vazão do vazamento, a seguir indicadas.

Tempo de Ensaio(horas)	Vazões(ml/min)	
	Permeâmetro	Vazamento
94	15,50	0,38
117,67	15,50	0,78
171,82	15,75	0,53
237,15	16,50	0,55
261,49	15,75	0,65
285,40	15,63	0,70
405,57	15,75	1,78
453,40	15,00	1,75
503,90	14,50	2,00
578,82	13,75	4,25
652,90	14,15	3,50

Os dados mostrados para P-3 revelam um crescimento significativo do vazamento da ordem de 0,02% para 25%, em comparação com a vazão do permeâmetro. Reconhece-se que, este vazamento gera incorreções no cálculo da permeabilidade, no entanto, o valor máximo deste erro é de 25%, o que não chega a invalidar o ensaio.

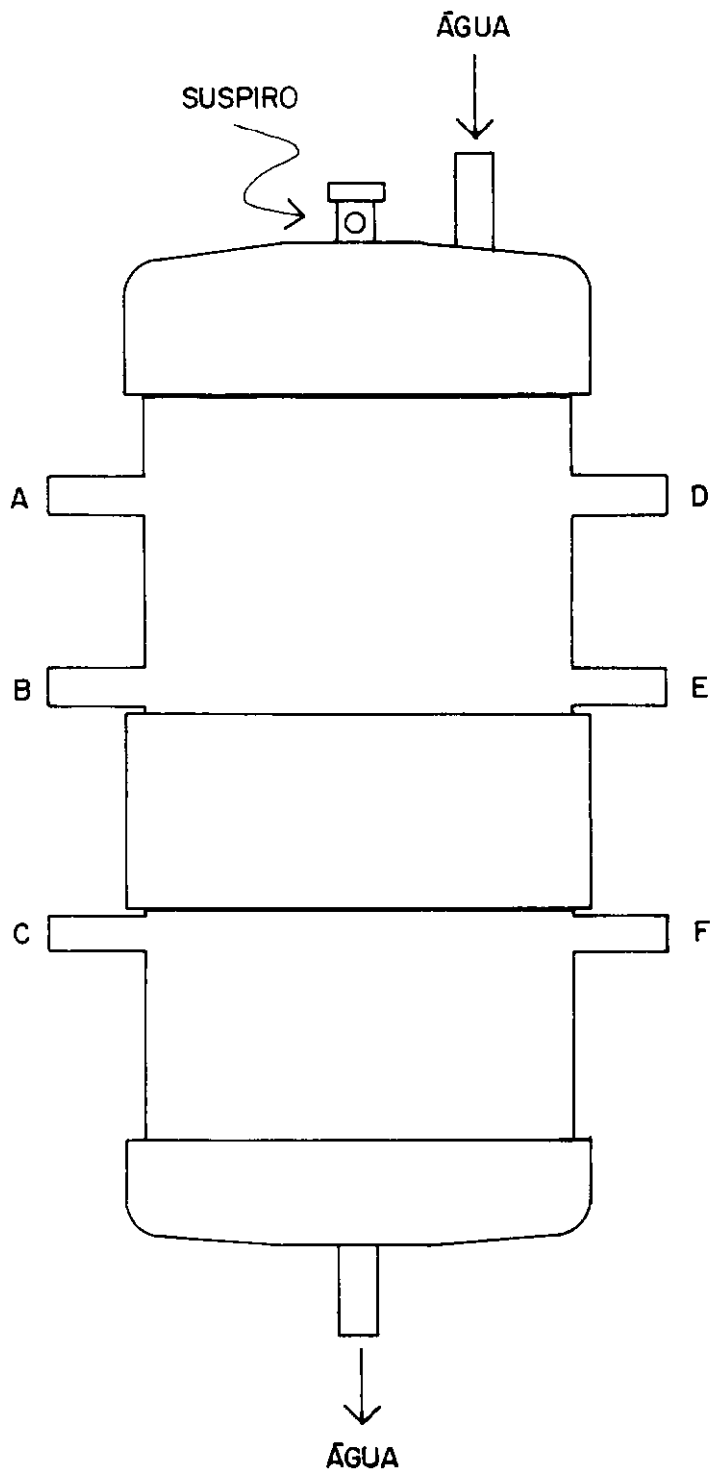


Figura IV.4 Configuração dos Piezômetros no Programa I

Na situação descrita, uma possibilidade de prejuízo maior para o ensaio ocorreria se o vazamento causasse um caminho de fluxo preferencial, no contato da parede com a amostra, afetando a leitura do piezômetro e de fato isto não se verificou.

IV.5.1.2 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos no ensaio de filtração estão mostrados nas figuras IV.5 a IV.8. Como indicado nas figuras, K_1 fornece a permeabilidade do solo adjacente ao geotêxtil. E, como foi visto nos subitens II.4.1 e II.6.2, a região do solo contígua ao geotêxtil sofre um rearranjo de partículas. Dessa forma, K_1 reflete as alterações de permeabilidade induzidas no solo pela presença do geotêxtil. Por outro lado K_2 , que também está indicado nas figuras mencionadas, expressa a permeabilidade do solo propriamente dito. Já a permeabilidade do sistema K , relativa a toda extensão da amostra de solo, não aparece nas figuras IV.5 a IV.8. O motivo será explicado quando da discussão dos resultados.

No cálculo da permeabilidade K_1 , a espessura do filtro não foi considerada no comprimento do caminho de percolação. Este procedimento, no que se refere aos geotêxteis, é uma decorrência dos elevados valores de permeabilidade que eles apresentam frente aos solos. Em virtude disto, a perda de carga nos geotêxteis é desprezada. Enquanto que para o papel filtro, o procedimento adotado justifica-se devido a reduzida espessura do papel, que pode ser

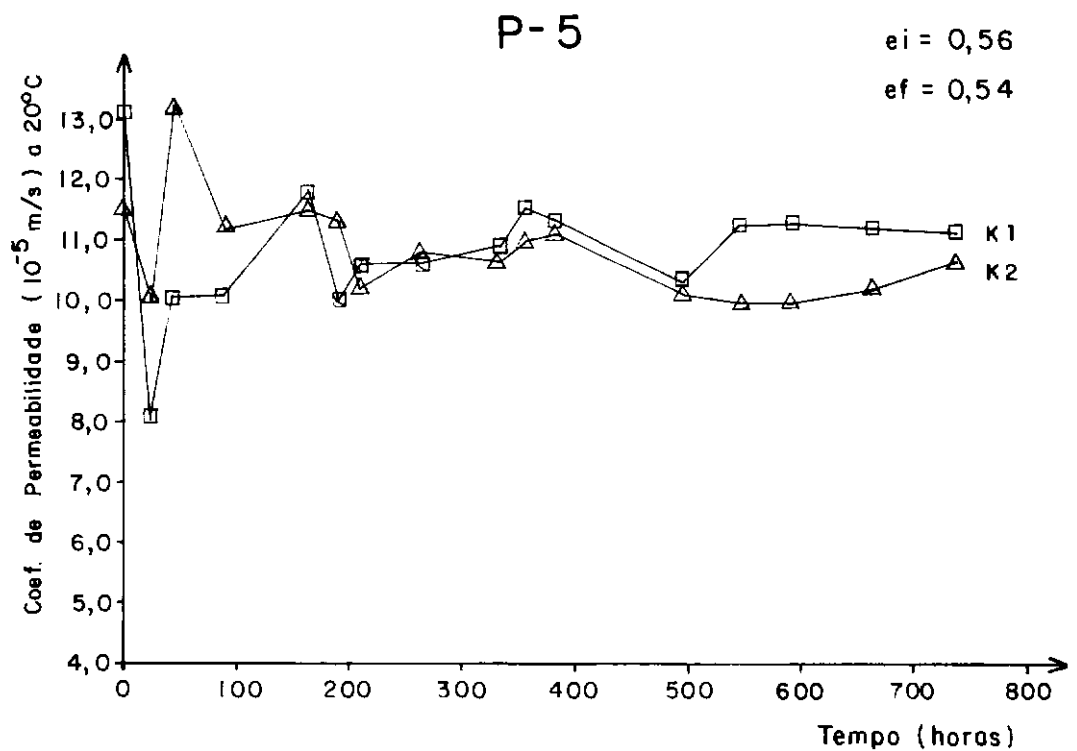
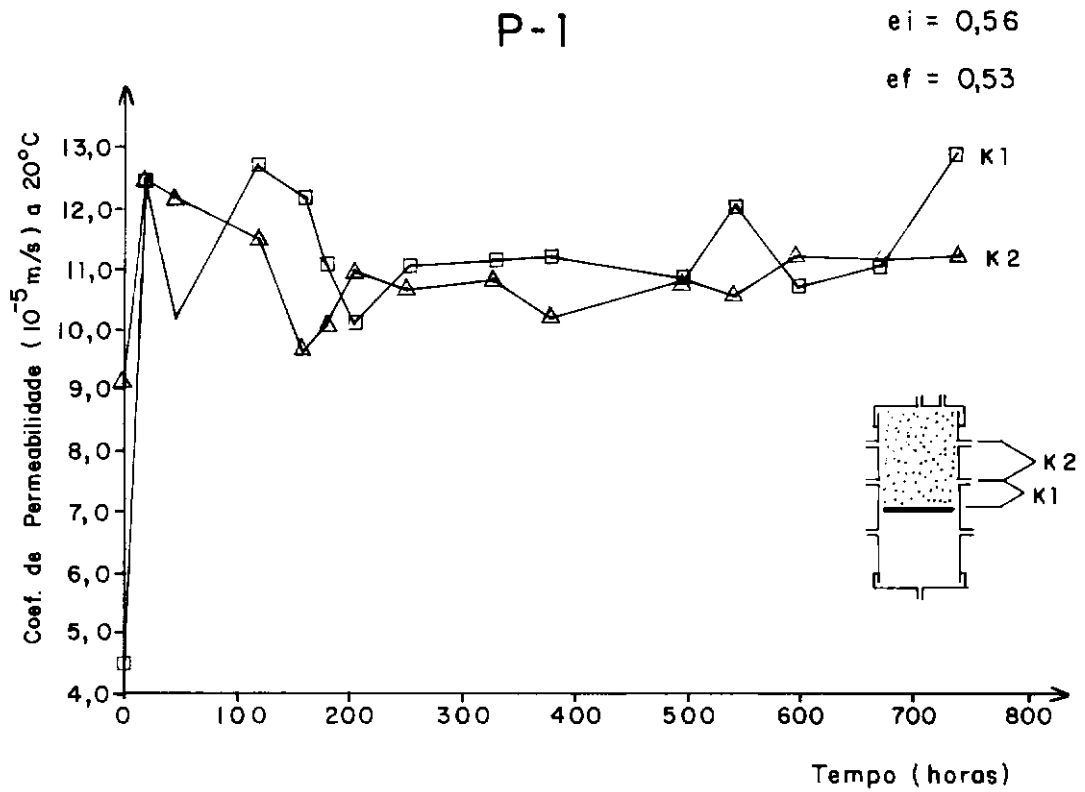


Figura IV.5 P-1 e P-5 com Areia de S.F. (#50-100) e o Typar 3267

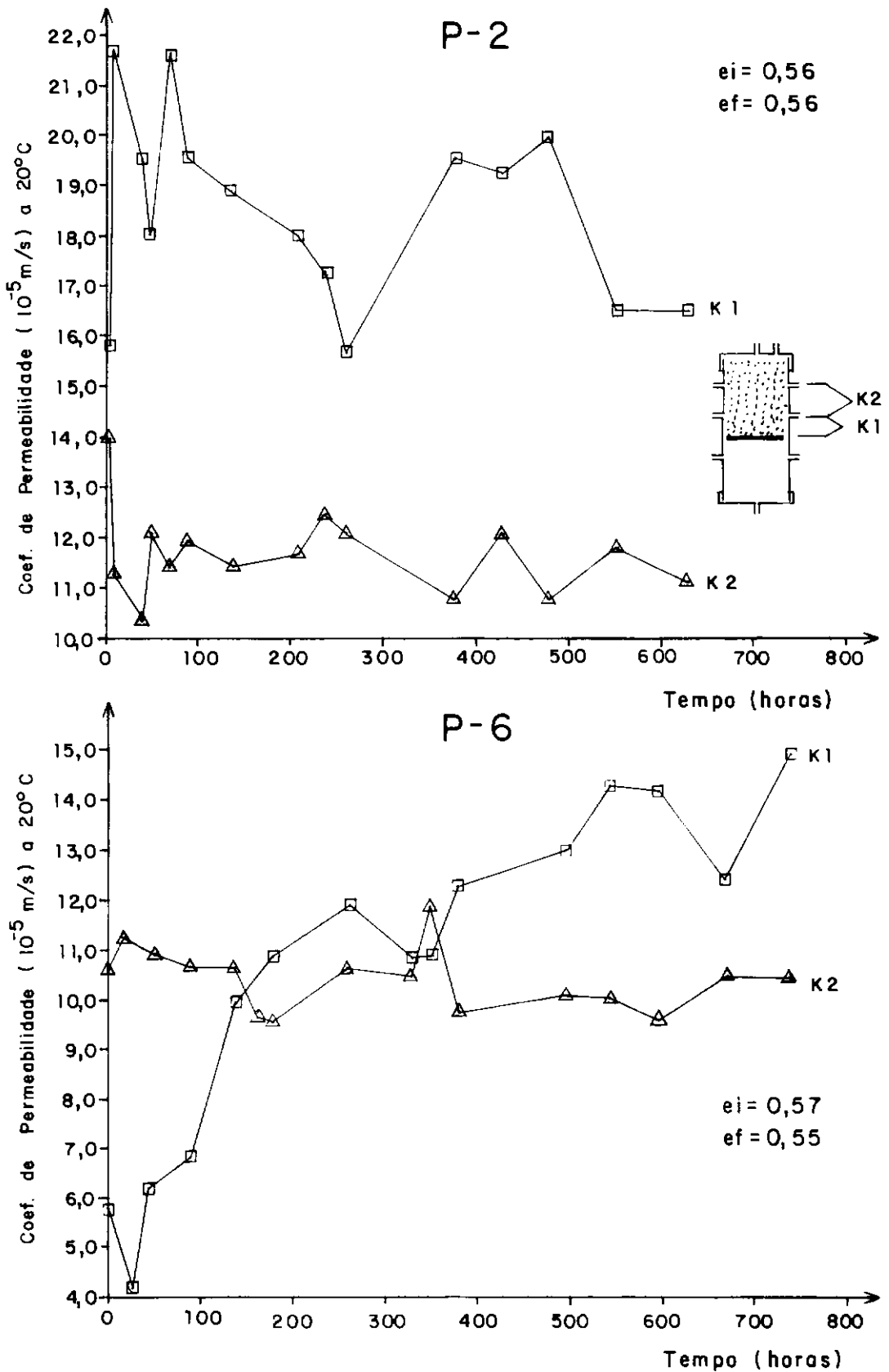


Figura IV.6 P-2 e P-6 com Areia de S.F. (#50-100) e o Propex 4004

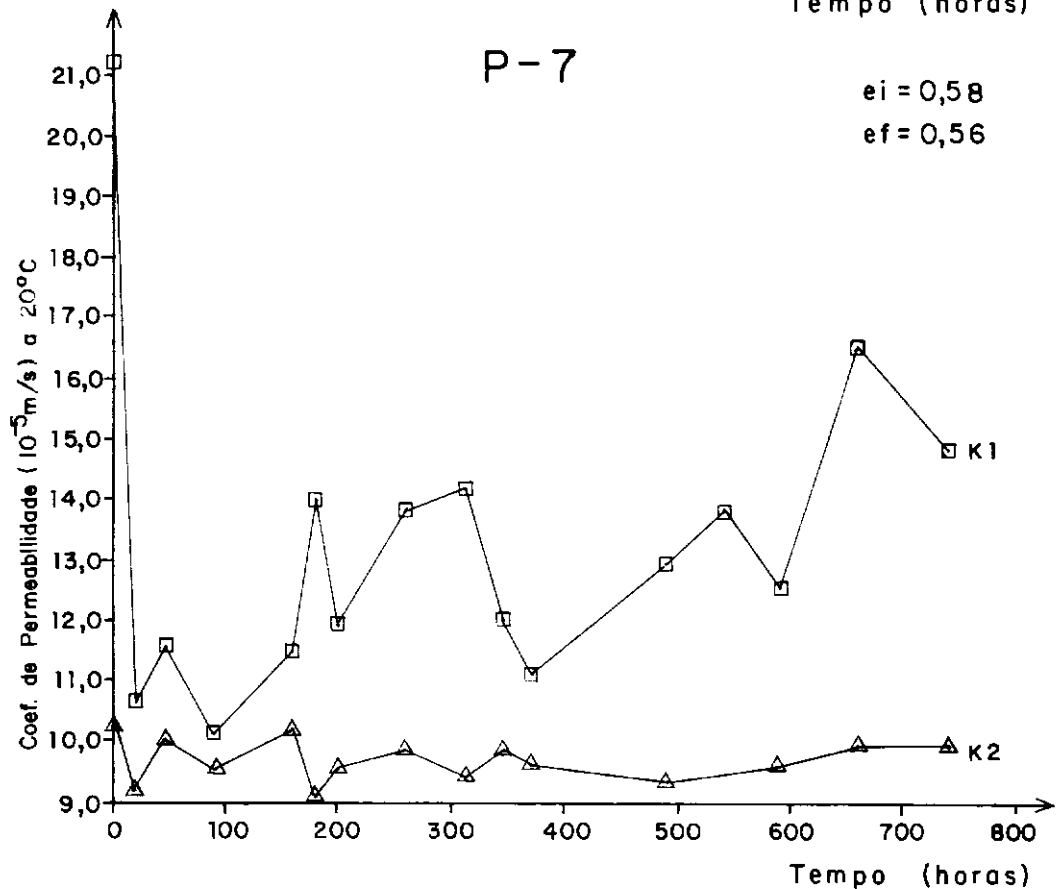
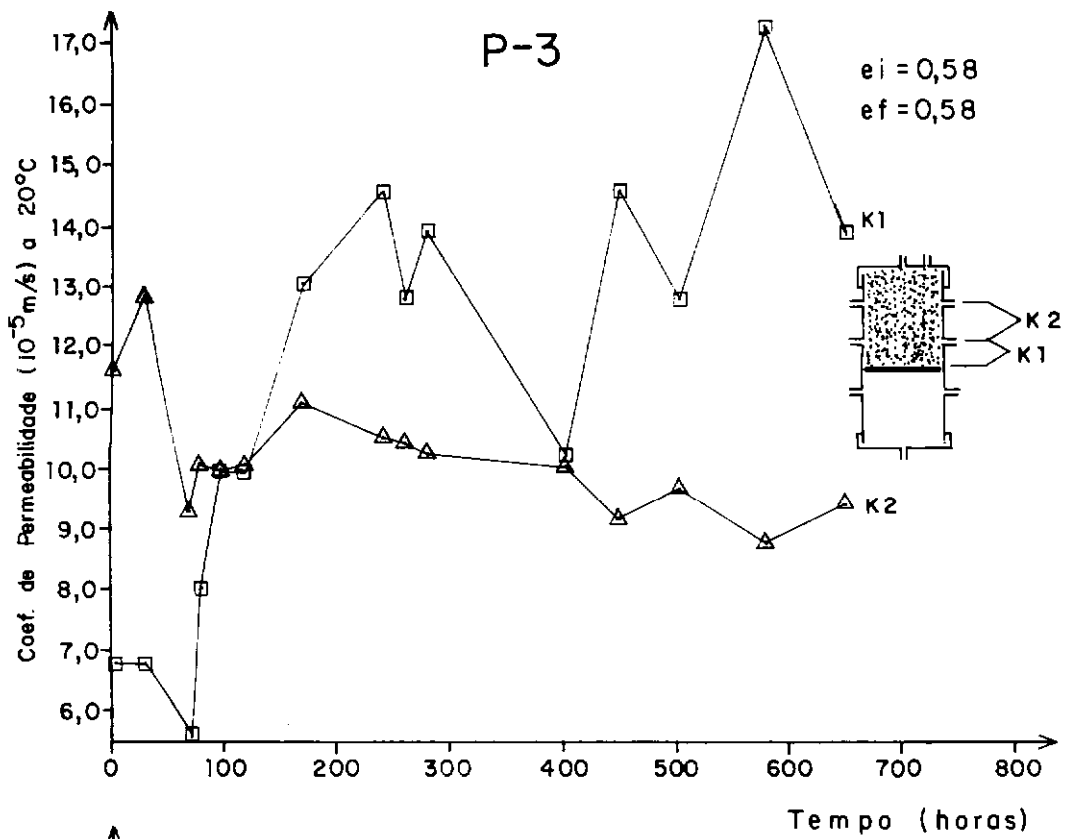


Figura IV.7 P-3 e P-7 com Areia de S.F. (# 50-100) e o Bidim OP-20

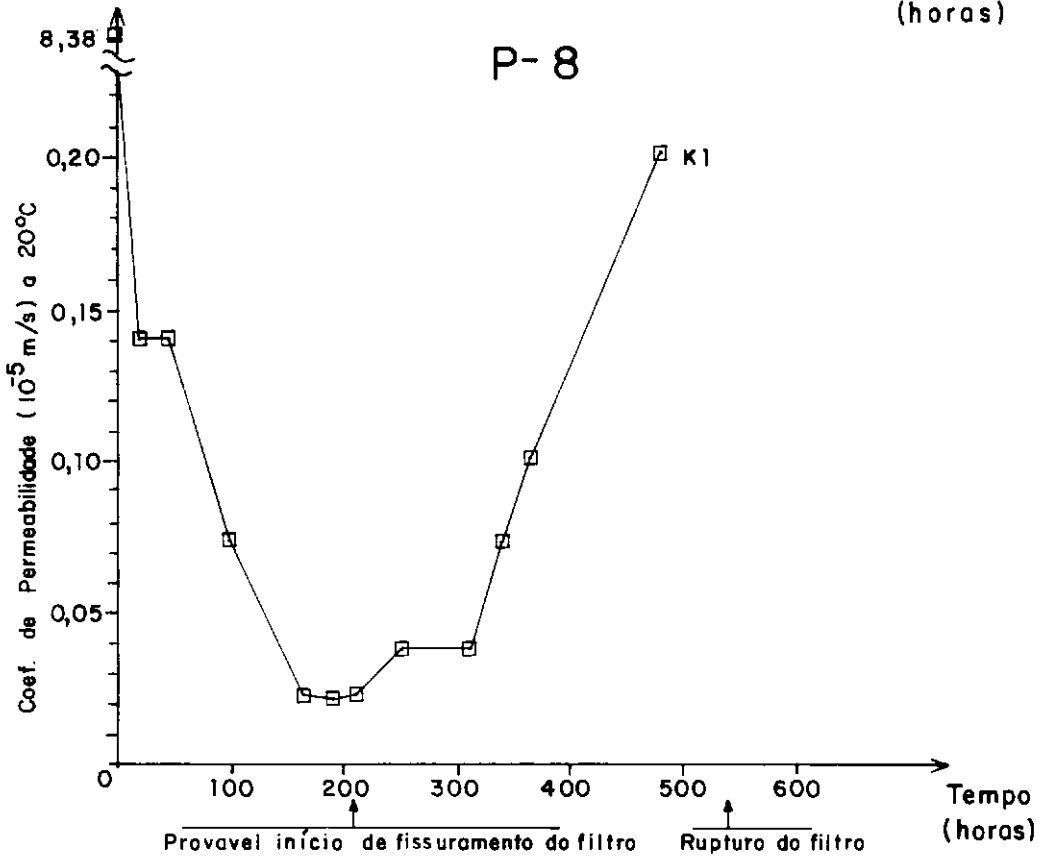
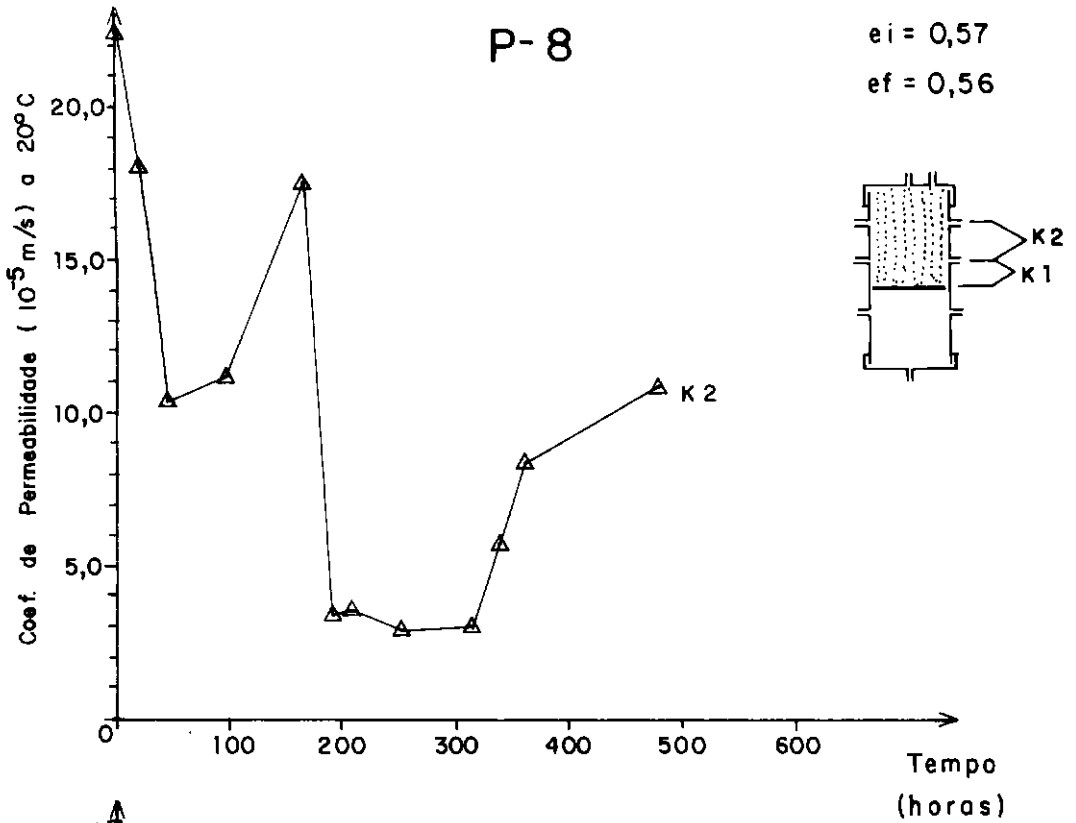


Figura IV.8 P-8 com Areia de S.F. (# 50-100) e o papel filtro

negligenciada.

Para o cálculo das permeabilidades K_1 e K_2 , de uma forma geral, foi considerada a perda de carga média, definida a partir do par de piezômetros existentes em três níveis do permeâmetro, ver figura IV.4. Entendeu-se que este procedimento era razoável quando os valores das leituras piezométricas de um mesmo nível apresentavam-se próximos. Somente no caso de P-2, para o cálculo de K_1 , o procedimento foi diferente do anteriormente descrito. Neste caso o cálculo de K_1 foi realizado somente com leitura de F ignorando-se a leitura de C, o outro piezômetro deste nível. Agiu-se assim a partir da leitura de 237,16 horas de ensaio (inclusive) pois neste instante do ensaio a leitura em C praticamente nivelou com a de B, do nível imediatamente acima, ver figura IV.4. O fenômeno relatado aponta para existência de um caminho preferencial de fluxo na região entre e circunvizinha a B e C, a partir daquele momento, indicado anteriormente, do ensaio.

Durante a realização do ensaio com o papel filtro (P-8) constatou-se, transcorridas 537 horas de ensaio, a presença de areia junto ao tubo de saída. Tal fato, foi um indicativo da ruptura do papel filtro. A figura IV.9 apresenta o perfil da amostra de areia em P-8, ao final do ensaio.

Os índices de vazios inicial (e_i) e final (e_f) da amostra de areia submetida ao ensaio estão indicados nas figuras IV.5 a IV.8. O índice de vazios final foi determinado admitindo-se que o peso de areia ensaiado manteve-se constante e a variação de volume, quando houve, foi unicamente resultado da compressão induzida pelas forças de per-

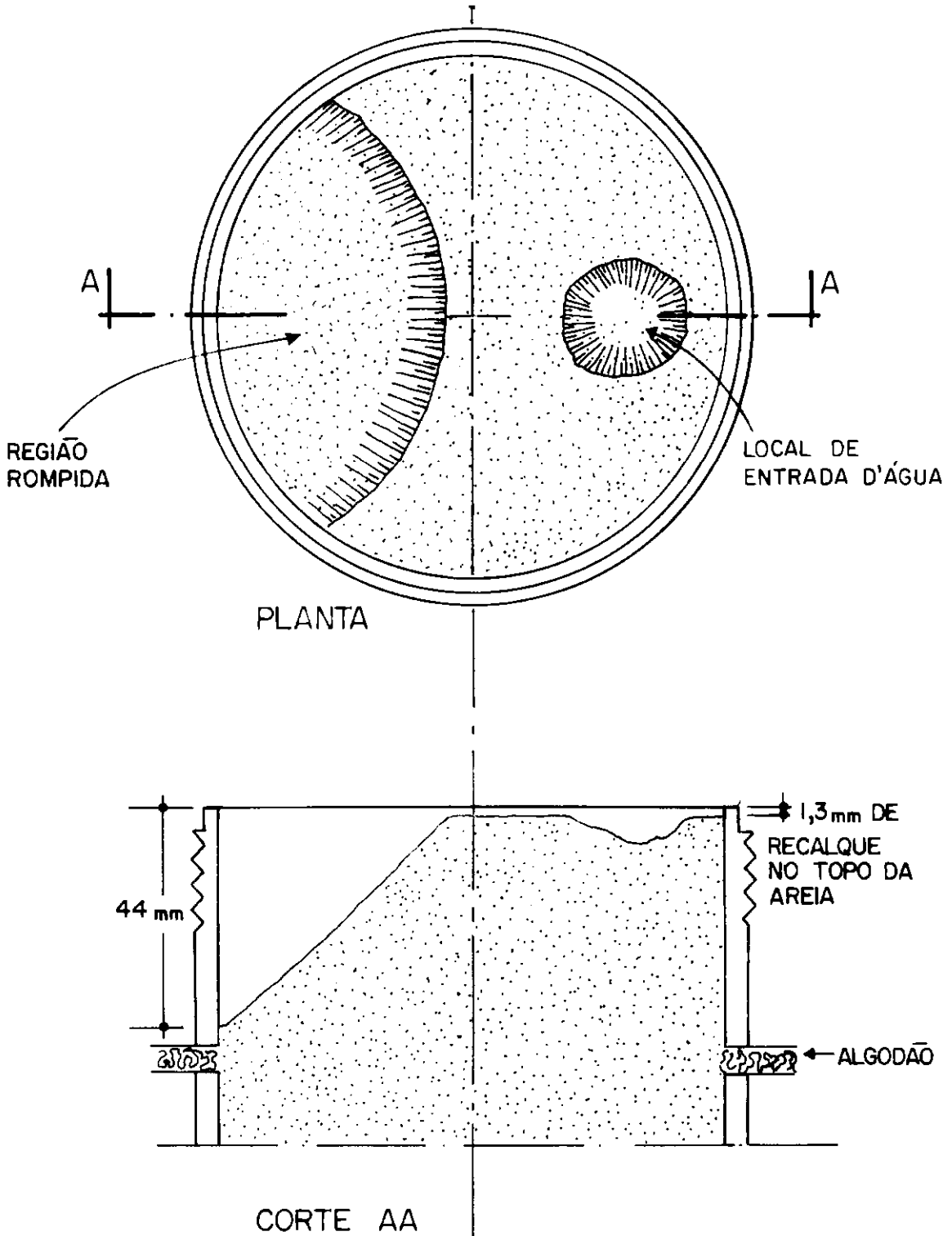


Figura IV.9 Perfil da Amostra de Areia dentro de P-8 ao Final do Ensaio de Filtração

colação. No entanto, detectou-se na etapa de pluviação da amostra de areia, no interior do permeâmetro, que uma quantidade de areia muito pequena era capaz de passar pelos geotêxteis.

A seguir, apresenta-se um valor representativo de GR ("Gradient Ratio") obtido para cada permeâmetro ao longo do ensaio de filtração, pois a variação de GR, por permeâmetro, foi pequena durante o ensaio. Lembrando que GR é a relação i_1/i_2 , onde i_1 e i_2 são os gradientes hidráulicos utilizados para o cálculo de K_1 e K_2 .

Permeâmetro	P-1	P-2	P-3	P-4
Filtro	Typar 3267	Propex 4004	Bidia OP-20	Papel Filtro
GR	1,0	0,5	0,8	-

Permeâmetro	P-5	P-6	P-7	P-8
Filtro	Typar 3267	Propex 4004	Bidia OP-20	Papel Filtro
GR	0,95	0,8	0,6	150

Sabendo-se que o valor de GR na primeira leitura em P-8 foi 2,67, evoluindo para algo em torno de 150 já a partir da segunda leitura.

Nos ensaios de filtração os valores médios de vazão mantiveram-se por volta de 2 l/min/m² para os filtros de geotêxteis enquanto que para o papel filtro a vazão caiu de 0,30 até 0,023 l/min/m².

IV.5.1.3 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Pode afirmar-se que funcionou a contento, de uma forma geral, a operação do equipamento desenvolvido (permeâmetros, potes de entrada e saída, quadro de piezômetros, ligações existentes entre tubos, tubos e potes, e por fim tubos e permeâmetros) além dos dois filtros empregados para o tratamento da água de alimentação do ensaio. Esta assertiva é suportada por:

- o valor da permeabilidade da areia de São Francisco determinada nos ensaios (P1 a P7) variou entre 10 a 11 $\times 10^{-3}$ m/s, ao longo do tempo ratificando uma constância esperada. Além disso, a faixa de valores da permeabilidade da areia está de acordo com 9×10^{-3} m/s, valor encontrado a partir da correlação $K=0,35 (D_{10})^2$, citada em II.7.1;
- o grau de repetibilidade obtido na determinação da permeabilidade da areia (K2) foi bom, com exceção de P-8, que se explica pelo fato da perda de carga ter concentrado-se na região do papel filtro, fazendo com que os piezômetros encarregados pela determinação da permeabilidade da areia estivessem praticamente nivelados, não fornecendo mais leituras com a precisão necessária para o correto cálculo da permeabilidade;
- a constatação da inexistência de sedimentos no topo da amostra de areia, quando da abertura dos "caps" dos permeâmetros, constituiu-se numa evidência do bom funcionamento dos filtros de tratamento d'água de alimentação do ensaio;

- a vazão obtida para os permeâmetros com filtros de geotêxteis foi da ordem de $2,0 \text{ l/min/m}^2$ e com o papel filtro foi de $0,023 \text{ l/min/m}^2$, assim a vazão do papel filtro é 1,2% da verificada com os outros filtros. Imaginando-se a situação limite, em que o papel filtro tenha colmatado-se por completo, a vazão medida no permeâmetro com papel filtro refere-se unicamente a que se verificaria no contato do filtro com as paredes do mesmo. O percentual de 1,2% representa um limite superior, no caso dos ensaios com filtros de geotêxteis, do percentual do fluxo que pode ocorrer durante o ensaio junto as paredes do permeâmetro.

Enfocando-se os resultados, em si, obtidos nos ensaios (P-1 a P-7) observam-se que os valores de permeabilidade de K_1 variaram de forma ampla no intervalo de tempo de 0 a 100 horas, com exceção de P-5. Acredita-se que esta instabilidade seja consequência do rearranjo de partículas, bem como, devido à expulsão do ar ainda presente no interior da amostra. E no caso de P-2 e P-6 (Propex 4004), P-3 e P-7 (Bidim OP-20), o rearranjo de partículas ocasionou alguma pequena migração de partículas, que não se pode detectar anteriormente. Isto é o que se pode entender já que os valores de K_1 , a partir das 100 horas, mantiveram-se dentro de um patamar superior ao de K_2 , indicando uma região de maior permeabilidade no solo junto aos geotêxteis. Também percebe-se nos ensaios P-1 a P-7 que os valores de K_1 , após as 100 horas, variaram dentro de uma faixa sem uma tendência definida mostrando uma estabilidade no contexto de intervalos específicos para cada ensaio. Estes dados foram resumidos e são mostrados a seguir.

Permeâmetros	Variação de K_1 com o tempo a partir de 100 horas			
	Valor Sup. (10^{-8} m/s)	Valor Inf. (10^{-8} m/s)	Intervalo ($\times 10^{-8}$)	Valor Médio (10^{-8} m/s)
P-1 (Tygar 3267)	12,7	9,8	2,9	11,11
P-5 (Tygar 3267)	11,7	9,8	1,9	10,92
P-2 (Propex 4004)	20,0	15,6	4,4	17,76
P-6 (Propex 4004)	15,0	10,8	4,2	12,39
P-3 (Bidim OP-20)	17,0	10,0	7,0	13,27
P-7 (Bidim OP-20)	16,5	11,2	5,3	13,22

Analisando-se os dados acima, nota-se que a repetibilidade na determinação de K_1 , sob o ponto de vista de intervalo de variação e valores médios, foi boa: com P-1, P-5 (Tygar 3267) e com P-3, P-7 (Bidim OP-20); e razoável com P-2, P-6 (Propex 4004). No caso de P-1, P-5 e P-3, P-7 os intervalos de variação representados pelos valores médios diferem em menos de 2% e no caso de P-2, P-6 em 31%. O grau de repetibilidade atingido pelos ensaios torna-se mais significativo quando é lembrado que a ordem de grandeza dos coeficientes de permeabilidade é expressa em potências de 10 (... 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} m/s ...) e que cada um destes valores difere do outro em 1000%.

Já os valores de K_1 obtidos para P-8 (papel filtro) mostraram nítida tendência de queda até 190 horas de ensaio, sendo que entre as duas primeiras leituras houve um decréscimo de 98,3% no valor de K_1 . Após 210 horas de ensaio verificou-se, provavelmente em virtude de um processo de fissuramento do papel filtro, a inflexão da trajetória $K_1 \times$ Tempo. A partir de então, observou-se um contínuo crescimento de K_1 até 537 horas de ensaio, quando se constatou a presença de areia preenchendo o tubo de saída do

permeâmetro, indicando ocorrência de ruptura do filtro. A diminuição inicial da permeabilidade K_1 pode ser explicada por um severo processo de bloqueamento por partículas coloidais, remanescentes na água do processo de tratamento. É o que se conclui, visto o processo de colmatção ter ocorrido em intervalo muito curto (16 horas), de acordo com o explicado no item II.6.2. Devido sua maior abertura, os filtros geotêxteis permitiram a passagem das partículas coloidais, não sofrendo conseqüentemente o processo de colmatção. De forma a certificar a explicação do processo, anteriormente descrito, procedeu-se a realização de um outro ensaio de filtração de curta duração (75 horas) unicamente com papel filtro sem a presença de solo. Neste ensaio, apesar da ausência de solo, constatou-se o mesmo processo de colmatção, referendando a explicação apresentada acima.

Com respeito à permeabilidade K do sistema, sua determinação ficou comprometida neste programa de ensaios. Verificou-se, que os valores calculados para K , quando se considera a perda de carga hidráulica no conjunto solo-geotêxtil, igual a diferença de altura entre níveis d'água de entrada e saída, são menores do que os valores reais. Isto ocorre pelas perdas de carga nos tubos que ligam o permeâmetro aos potes de entrada e saída d'água, fazendo com que a perda hidráulica real seja menor do que a considerada no cálculo. De tal forma que nos ensaios, quando valores de K_1 e K_2 coincidiram, o valor calculado para K não se mostrou igual aos dois primeiros, ficando 30% abaixo.

A aplicação dos critérios de projeto de filtro de geotêxtil, para o programa 1, fornece as seguintes informações quanto a:

- capacidade de retenção - a tabela IV.1 resume os dados obtidos, sabendo-se que, em cada critério foram utilizados os valores de abertura de filtração disponíveis e indicados no item IV.3.1;
- permeabilidade - os filtros de geotêxteis utilizados passam em todos os critérios apresentados no item II.7.2;
- colmatagem - todos os geotêxteis atenderam nos ensaios ao critério do FHWA que recomenda $GR < 3$ para aplicações severas.

Como os filtros geotêxteis nos ensaios realizados mostraram-se eficientes quanto a capacidade de retenção de partículas, apesar de que em alguns casos, os critérios do CFGG, FHWA e Código da Alemanha Ocidental não terem sido satisfeitos, conclue-se que estes critérios são conservadores para as condições dos ensaios (gradiente hidráulico, densidade e granulometria da amostra). O critério de Mlynarek, na tabela IV.1, indica que os filtros Typar 3267 e Biddim OP-20 estão a favor da segurança em demasia, para o caso da areia utilizada no ensaio.

A aplicação dos critérios de projeto de filtros de geotêxteis para o papel filtro indicaria consistentemente: que o papel filtro tem uma capacidade de retenção muito elevada; que não passaria nos critérios de permeabilidade; e o resultado obtido de $GR=150$ assinala que houve colmatagem durante o ensaio.

Origem	Critério	Typar 3267	Propex 4004	Bidim OP-20
CFGG	$FOS < C1.C2.C3.C4.d_{85}$	passa	não passa	passa
FHWA	$AOS \leq B d_{85}$	passa	não passa	passa
IRIGM/EPM	$FOS < 1,5 d_{85}$	passa	passa	passa
GIROUD	$AOS < 2CU^{1,0,3} d_{85}$	passa	passa	passa
CÓDIGO_ALEMAO	$D_w < d_{90}$	passa	não passa	passa
MLYNAREK	$2 d_{15} < AOS < 2 d_{85}$	não passa no limite inferior	passa	não passa no limite inferior

Tabela IV.1 Critérios de Capacidade de Retenção Aplicados ao Programa I

IV.5.2 - PROGRAMA 2

O programa foi composto de acordo com os elementos a seguir:

Permeâmetro	P-5	P-7
Solo Protegido	Caiuá	Cenozóico
Filtro Geotêxtil	Bidia OP-20	Bidia OP-20
Gradiente Hidráulico	i=1,0 (0 a 43,67 horas) i=2,5 (43,67 a 45,92 horas) i=4 (45,92 a 190,33 horas)	i=1,0 (0 a 43,67 horas) i=2,5 (43,67 a 45,92 horas) i=4 (45,92 a 190,33 horas)

IV.5.2.1 - EVENTOS REGISTRADOS

Neste programa, manteve-se o suspiro no "cap" superior e a mesma configuração de piezômetros utilizada no programa 1.

Pode perceber-se, ao longo dos dois ensaios, que grande parte da perda de carga hidráulica devido ao fluxo, ocorria no topo dos permeâmetros. De tal forma que, entre 164,92 a 165,42 horas de ensaio, fêz-se uma série de aberturas de suspiro, bem como, uma sangria na árvore de distribuição com objetivo de remover ar preso desta conexão. A medida produziu efeito, traduzindo-se na elevação dos níveis piezométricos de A e D em cada permeâmetro. De modo que, o aumento da altura piezométrica em P-5 e P-7 foi 50% e 200%, respectivamente. No entanto, 24 horas depois, as alturas piezométricas retornaram aos níveis anteriores.

IV.5.2.2 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

As variações das permeabilidades K_1 e K_2 com o tempo são apresentadas na figura IV.10. No cálculo de K_1 e K_2 foram consideradas as alturas piezométricas médias para um mesmo nível, já que houve equilíbrio nos valores lidos.

Os índices de vazios inicial e final, assim como os grãos de saturação das amostras dos solos ensaiados, estão indicados na figura IV.10. Para o cálculo do índice de vazios final (e_f), considerou-se que o peso da amostra ensaiada manteve-se constante e a variação volumétrica foi resultado da compressão induzida pelas forças de percolação. Estas afirmações têm base nas seguintes observações: quando da abertura, ao final do ensaio, não se verificou quantidade de partículas maior do que a suficiente para colorir a câmara inferior; e os resultados de controle da qualidade da água (turbidimetria), realizado durante os ensaios, apresentados a seguir, não registraram transporte significativo de partículas coloidais do solo.

Tempo de Ensaio (horas)	Local da Coleta	Condutância Elétrica Específica (microsiemens/cm)	Turbidimetria (FTU)
23,33	antes dos permeâmetros	72,4	0,40
23,68	depois do caixá	78,3	0,10
23,33	depois do cenozóico	-	0,09
90,17	antes dos permeâmetros	84,2	0,35
190,33	depois do caixá	83,1	0,60
190,63	depois do cenozóico	82,1	0,13
-	torneira (sem filtrar)	76,7	4,50

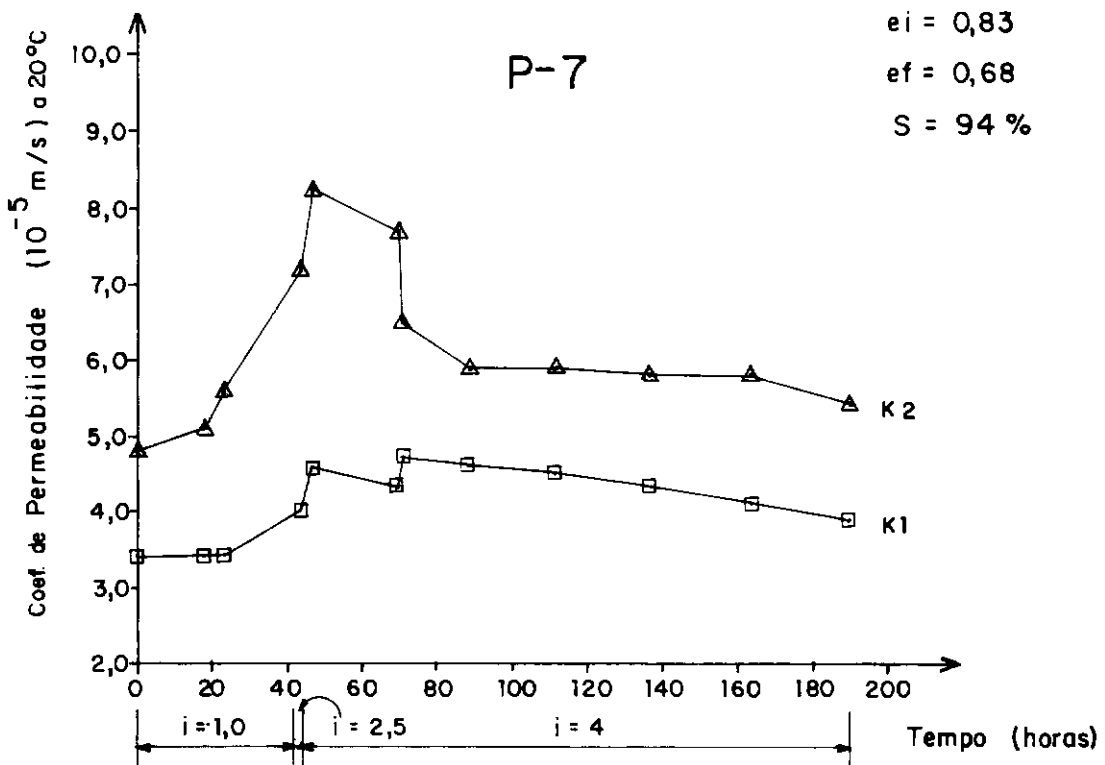
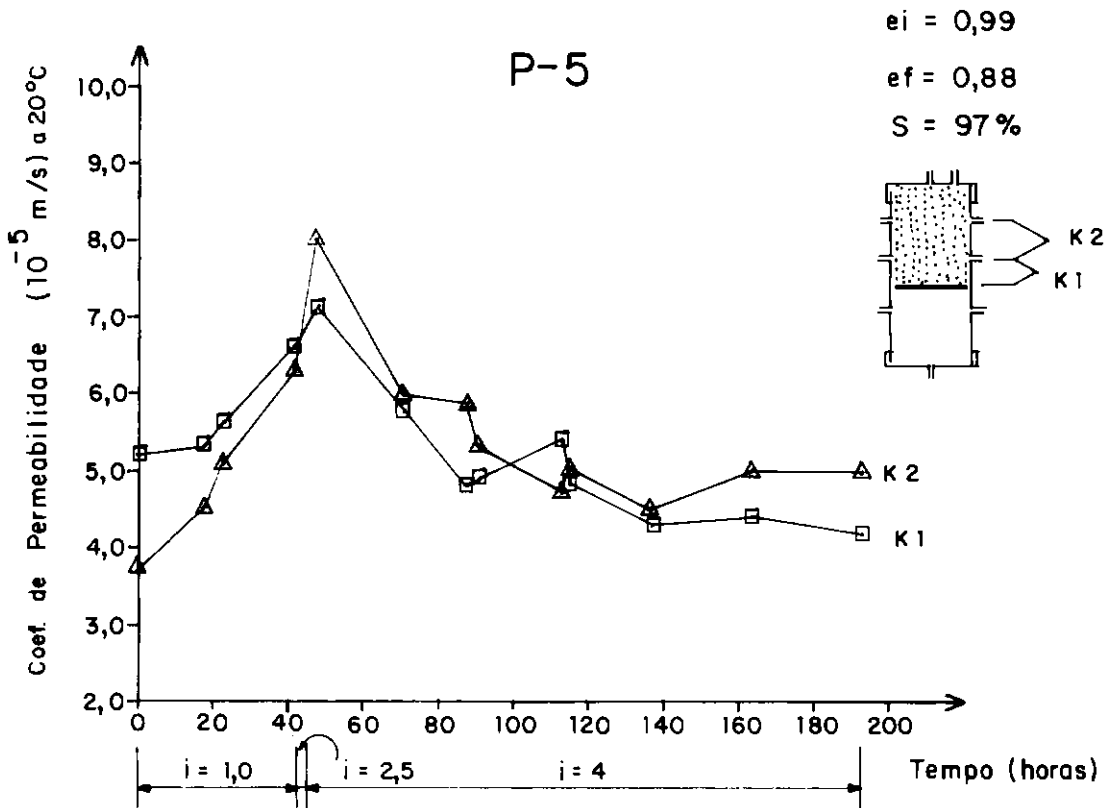


Figura IV.10 P-5 com Solo Caiuá e o Bidim OP-20
 P-7 com Solo Cenozóico e o Bidim OP-20

A análise dos dados anteriores comprova que a água do ensaio não foi afetada na sua capacidade de conduzir energia elétrica uma vez que sua condutância específica apresenta valores semelhantes antes e depois dos permeâmetros. Assim como, a qualidade de pureza da água não foi prejudicada pela passagem pelos permeâmetros já que sua turbidimetria indica valores da mesma ordem de grandeza.

Os valores de GR, ao longo do ensaio, mantiveram-se em torno de 1,0 para o ensaio P-5 (solo caiuá) e próximos a 1,6 para o ensaio P-7 (solo cenozóico).

Resultados dos ensaios, no que se refere ao aperfeiçoamento do equipamento para o próximo programa, são;

- a constatação da necessidade de eliminar-se a árvore de distribuição de água para os permeâmetros, fazendo com que a água do pote de entrada alcance diretamente os permeâmetros;
- consciência de que a substituição dos suspiros, instalados nos "caps" superiores por piezômetros, pode ser uma troca vantajosa.

IV.5.2.3 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As razões para a presença de ar na árvore de distribuição de água para os permeâmetros foram:

- bolhas de ar no tubo de entrada que eventualmente eram transportadas pela água e ao chegar ali ficaram retidas;
- ar remanescente do período de saturação da amostra, que pela ação do fluxo se despreendeu e subiu pelo tubo de entrada atingindo a árvore de distribuição, sendo então

aprisionado;

- ar dissolvido na água que se libertou para então ascender até atingir a árvore de distribuição.

A movimentação de ar descrita, tornou-se mais evidente neste programa, devido às seguintes condições impostas ao ensaio:

- a) amostras de solos com partículas finas;
- b) compacidade baixa das amostras de solos, ver abaixo;

Solos	$e_{inicial}$	e_{min} (Proctor Normal)
Caiuá	0,99	0,30
Cenozóico	0,83	0,38

c) aplicação de gradientes elevados.

Os valores ascendentes de K_1 e K_2 , figura IV.10, no intervalo de 0 a 47 horas são uma consequência da progressiva expulsão do ar dos vazios do solo, arrastado pelo fluxo d'água, remanescente de uma saturação incompleta das amostras de solo. A saturação progressiva das amostras torna o fluxo mais livre pelos vazios do solo, levando a um aumento na permeabilidade. Em torno das 47 horas de ensaio, a saturação das amostras alcança um máximo. Ao final dos ensaios o grau de saturação foi: ensaio P-5 (solo caiuá) $S=97\%$; ensaio P-7 (solo cenozóico) $S=94\%$.

A partir das 47 horas de ensaio, os valores de K_1 e K_2 , tanto em P-5 quanto em P-7, declinam até encontrar um patamar de estabilidade entre 90 horas e o final do ensaio. A figura IV.10 mostra também que, os valores finais de K_1 e K_2 , nos ensaios P-5 e P-7, estão próximos.

Por outro lado, os valores de K1 e K2, figura IV.10, ao longo do tempo, indicaram para P-7 (solo cenozóico) a ocorrência de migração de partículas, já que K1 apresentou-se menor do que K2 durante toda a duração do teste. Com P-5(solo caiuá) isto não aconteceu, na medida que os valores de K1 e K2 mantiveram-se próximos, a partir da segunda leitura, para afastarem-se um pouco somente nas duas últimas leituras. A tendência de migração de partículas determinada para o solo cenozóico no ensaio de filtração é concordante com o fenômeno de repulsão de partículas identificado a partir de sua análise físico-química, apresentada no item IV.3.2.

A variação dos índices de vazios dos solos, do início para o final do ensaio, foi 18% para o solo cenozóico e 11% para o solo caiuá, o que evidencia uma maior compressibilidade da amostra de solo cenozóico, frente às forças de percolação.

A aplicação dos critérios de projeto de filtros geotêxteis para o programa 2 revela quanto:

- capacidade de retenção - o Bidim OP-20 atende a todos os critérios apresentados em II.7.2 para os dois solos, a menos do critério do CFGG com o solo caiuá, onde a abertura de filtração do Bidim OP-20 é maior do que a recomendação do critério;
- permeabilidade - o Bidim OP-20 passa, para os dois solos, em todos os critérios apresentados;
- colmatção - o Bidim OP-20 atendeu, nos ensaios para os dois solos, o critério do FHWA que recomenda $GR < 3$ para aplicações severas.

Como o Bidim OP-20 nos ensaios realizados mostrou-se eficiente, quanto a capacidade de retenção de partículas, observa-se que o critério CFGG é conservador para as condições do ensaio P-5 (caiuá).

A escolha do solo a ser ensaiado no programa 3 recaiu sobre o solo do arenito caiuá. Para tal, levou-se em conta que o comportamento dos solos não se apresentou muito diverso e, também, a maior abrangência regional do solo arenito caiuá.

IV.5.3 - PROGRAMA 3

O programa 3 foi montado de acordo com os seguintes componentes.

Permeâmetro	P-1	P-2	P-3	P-4
Solo Protegido	Solo	do	Arenito	Caiuá
Filtro	Tygar 3267	Propex 4004	Bidim OP-20	A.M.Itaipuaçu
Gradiente Hidráulico	1,0	1,0	1,0	1,0

Permeâmetro	P-5	P-6	P-7	P-8
Solo Protegido	Solo	do	Arenito	Caiuá
Filtro	Tygar 3267	Propex 4004	Bidim OP-20	A.M.Itaipuaçu
Gradiente Hidráulico	1,0	1,0	1,0	1,0

Nota: A.M. = Areia Média

IV.5.3.1 - EVENTOS REGISTRADOS

Neste programa substituiu-se o suspiro utilizado até então, no topo do permeâmetro, por um piezômetro, figura IV.4. De modo que, a configuração de piezômetros é a mesma que a dos programas anteriores acrescida do piezômetro G (topo do permeâmetro). Ainda nesta campanha de ensaios, eliminou-se a árvore de distribuição de água para os permeâmetros, fazendo com que a água do pote de entrada alcance diretamente os permeâmetros.

Na leitura de 335 horas, quando os piezômetros G acusavam uma queda nos níveis piezométricos, na entrada dos permeâmetros de até 2 cm com relação aos iniciais, procedeu-se uma retirada de ar em todos os permeâmetros. Para isto, forçou-se o fluxo de água no topo do permeâmetro através do piezômetro G, até que não mais ocorresse a saída de ar. Após esta manobra, restabeleceram-se os níveis piezométricos iniciais. Este procedimento, então, passou a ser rotineiro, executado sempre anteriormente as leituras piezométricas e de vazão dos permeâmetros, ou quando se notas-se depressão dos piezômetros G.

A partir de 1125 horas de ensaio, observou-se a presença de sedimentos ferruginosos nos potes de entrada, ver foto IV.6. Estes sedimentos depositaram-se também sobre o solo, no topo dos permeâmetros. A partir deste momento, (1125 horas) as águas retiradas dos permeâmetros, através do fluxo nos piezômetros G, mostravam uma quantidade significativa de sedimentos. Outro evento, conjugado com a presença dos sedimentos, foi a diminuição notável da saída de

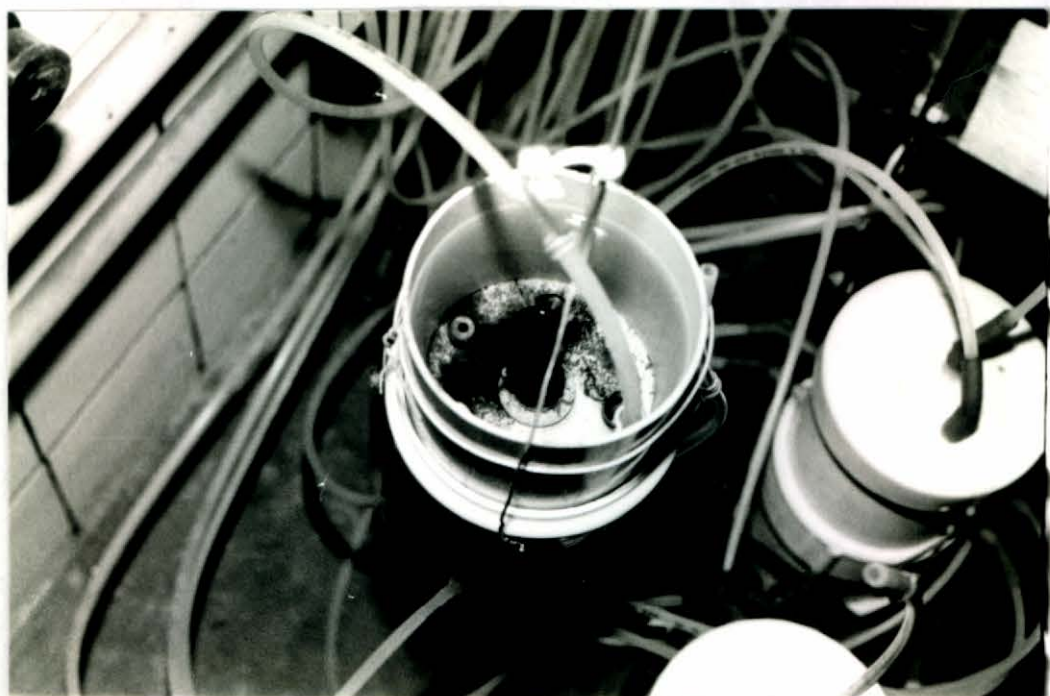


FOTO IV.6 - Detalhe de Sedimento Ferruginoso no Fundo do Pote de Entrada (P-5 a P-8)



Foto IV.7 - Detalhe de Sedimento Ferruginoso sobre o Solo em P-8.

bolhas de ar quando se provocava o fluxo d'água no piezômetro G.

Fez-se a interrupção do fluxo de água em torno das 1539 horas de ensaio, por duas horas de ensaio, para promover a remoção dos sedimentos, tanto no topo do solo no interior dos permeâmetros P-5 a P-8, ver foto IV.7, quanto no fundo do pote de entrada que os alimentam, foto IV.6. No entanto, logo após pode perceber-se que a tentativa de eliminar os sedimentos do pote, bem como, os efeitos produzidos por estes nos ensaios de filtração foi inócua. Já que, no dia seguinte, as permeabilidades das várias camadas do solo mantinham-se inalteradas e, dois dias depois, notavam-se novos vestígios de sedimentos que progressivamente foram-se depositando no fundo do pote. A partir de então, de modo a diminuir a presença dos sedimentos na água de alimentação dos permeâmetros, procederam-se limpezas periódicas nos potes de entrada, até o término dos ensaios.

IV.5.3.2 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Apresentam-se as figuras IV.11 a IV.18 com as variações das permeabilidades K_1 , K_2 , K_3 , e K ao longo do tempo de realização dos ensaios de filtração. Com a introdução do piezômetro G (topo permeâmetro) foi possível definir a permeabilidade na região superior do permeâmetro (k_3) e a permeabilidade do sistema (K), relativa a toda a extensão da amostra. Conforme apresentado na figura IV.4 pares de piezômetros monitoram cada nível da amostra no interior do permeâmetro (A e D, superiores; B e E, intermediários; C e F, inferiores). No cálculo da permeabilidade K_1 e K_2 para

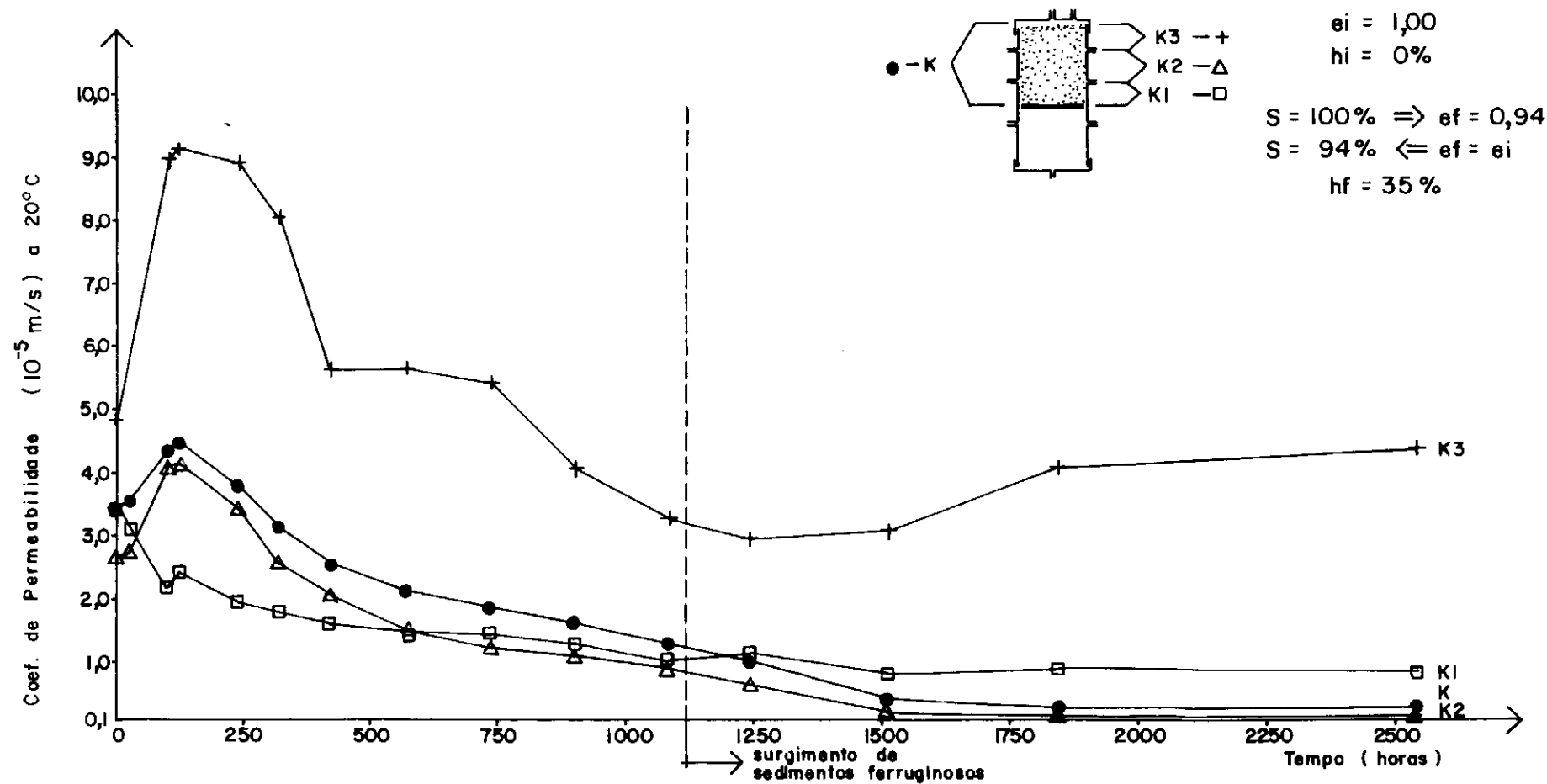


Figura IV. II P-I com Solo de Arenito Caiuã e o Typar 3267

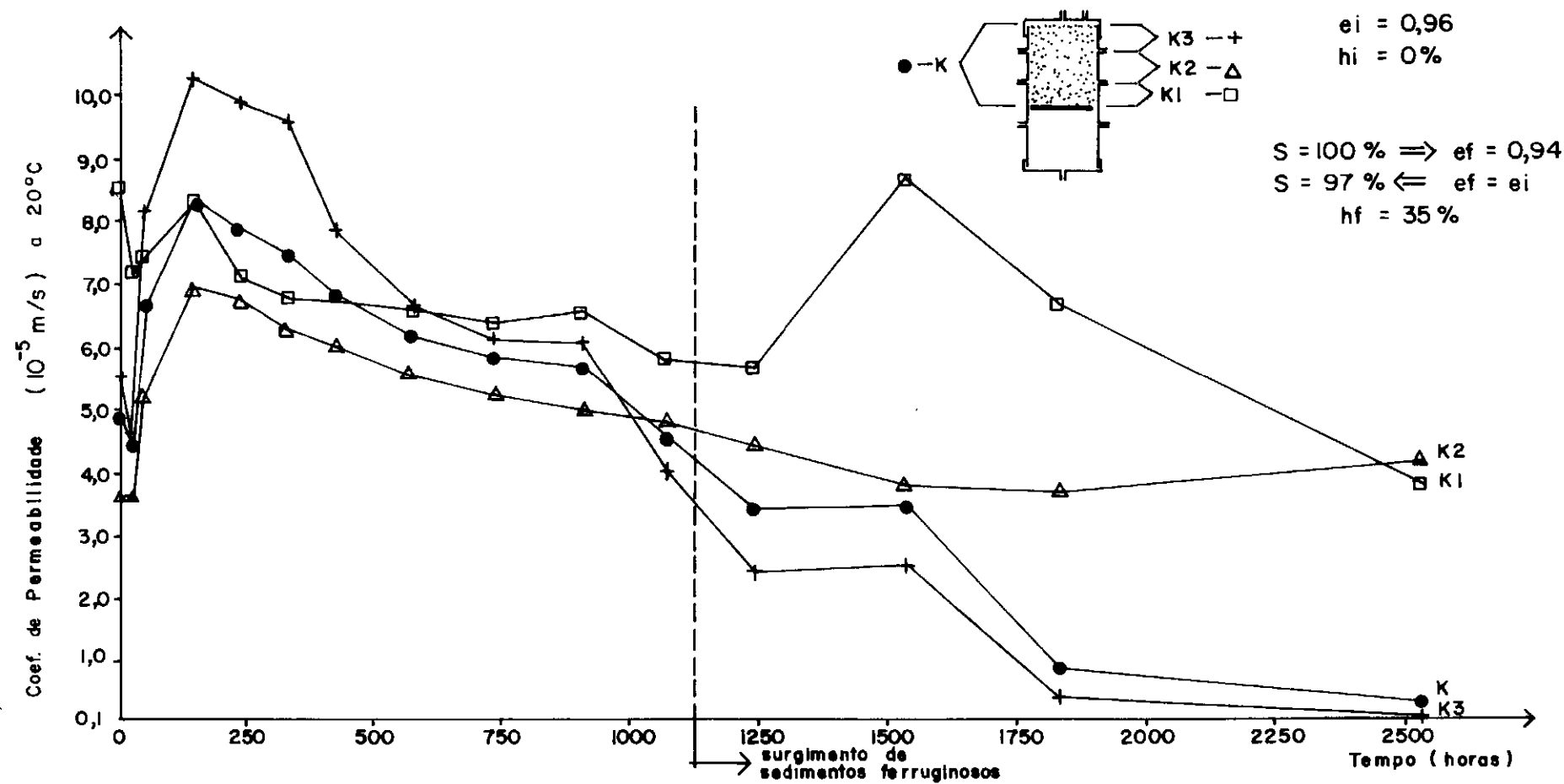


Figura IV.12 P-5 com Solo do Arenito Caiuã e o Tytar 3267

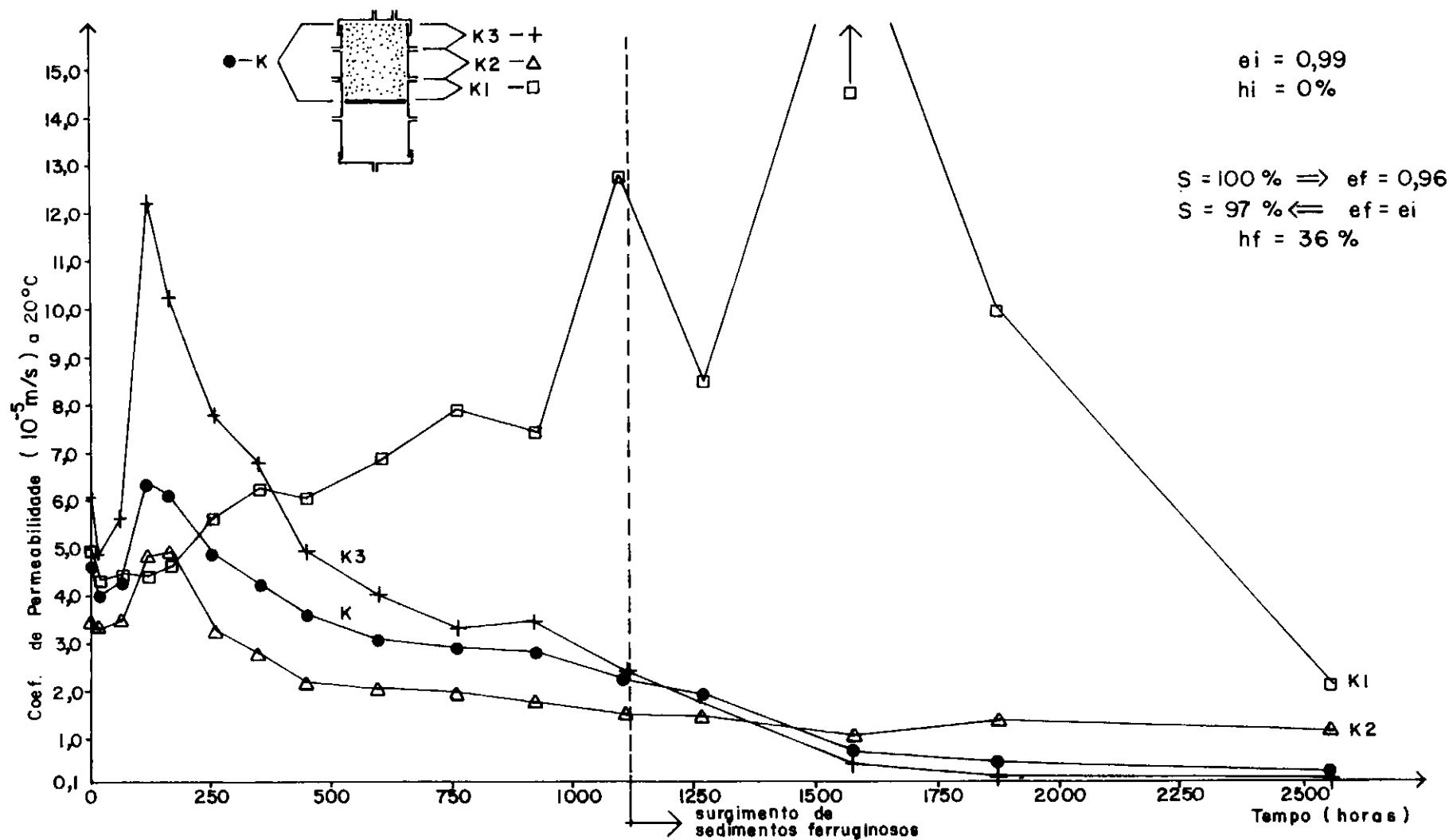


Figura IV.13 P-2 com Solo do Arenito Caiuã e o Propex 4004

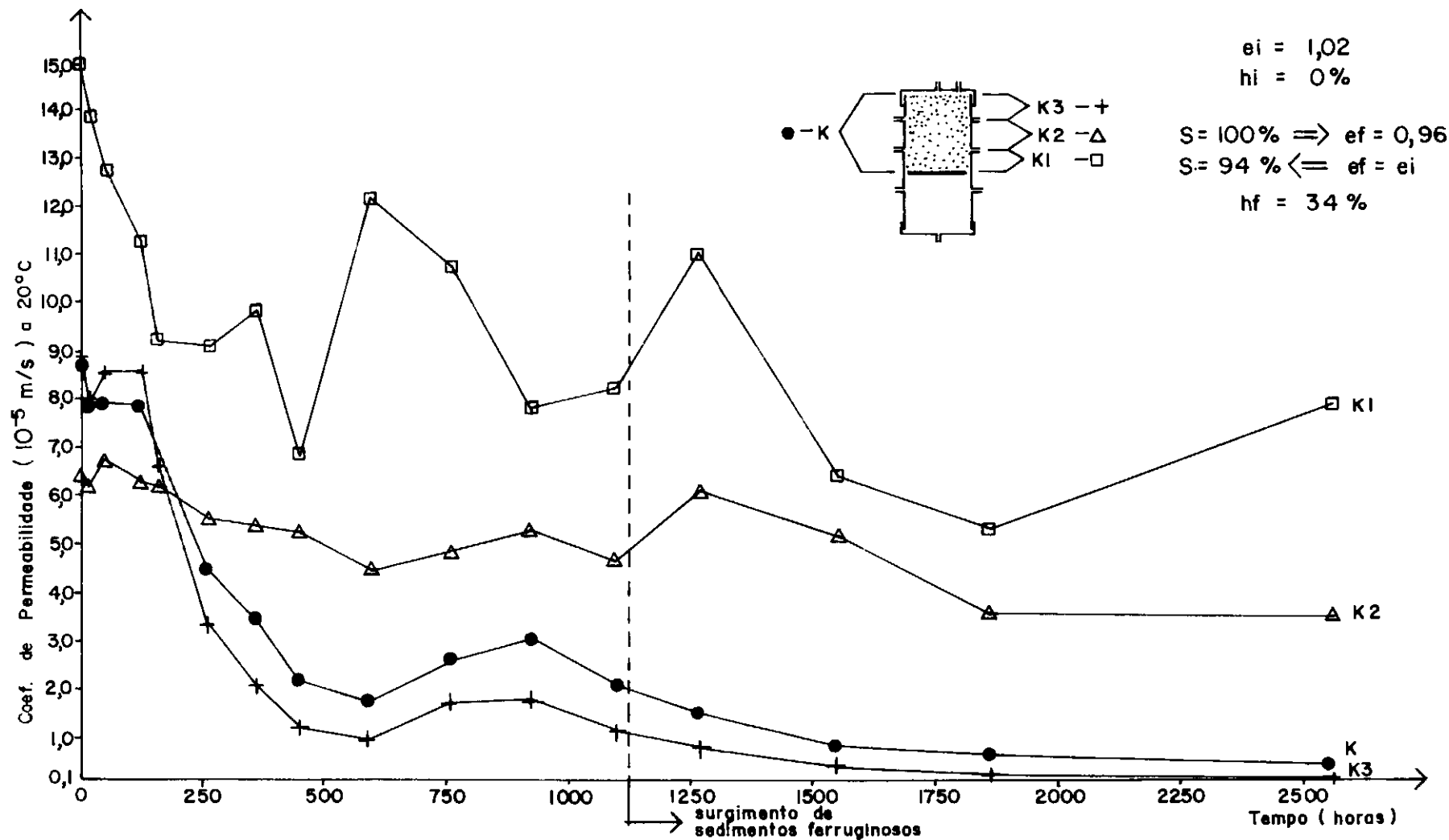


Figura IV.14 P-6 com Solo do Arenito Caiuã e o Propex 4004

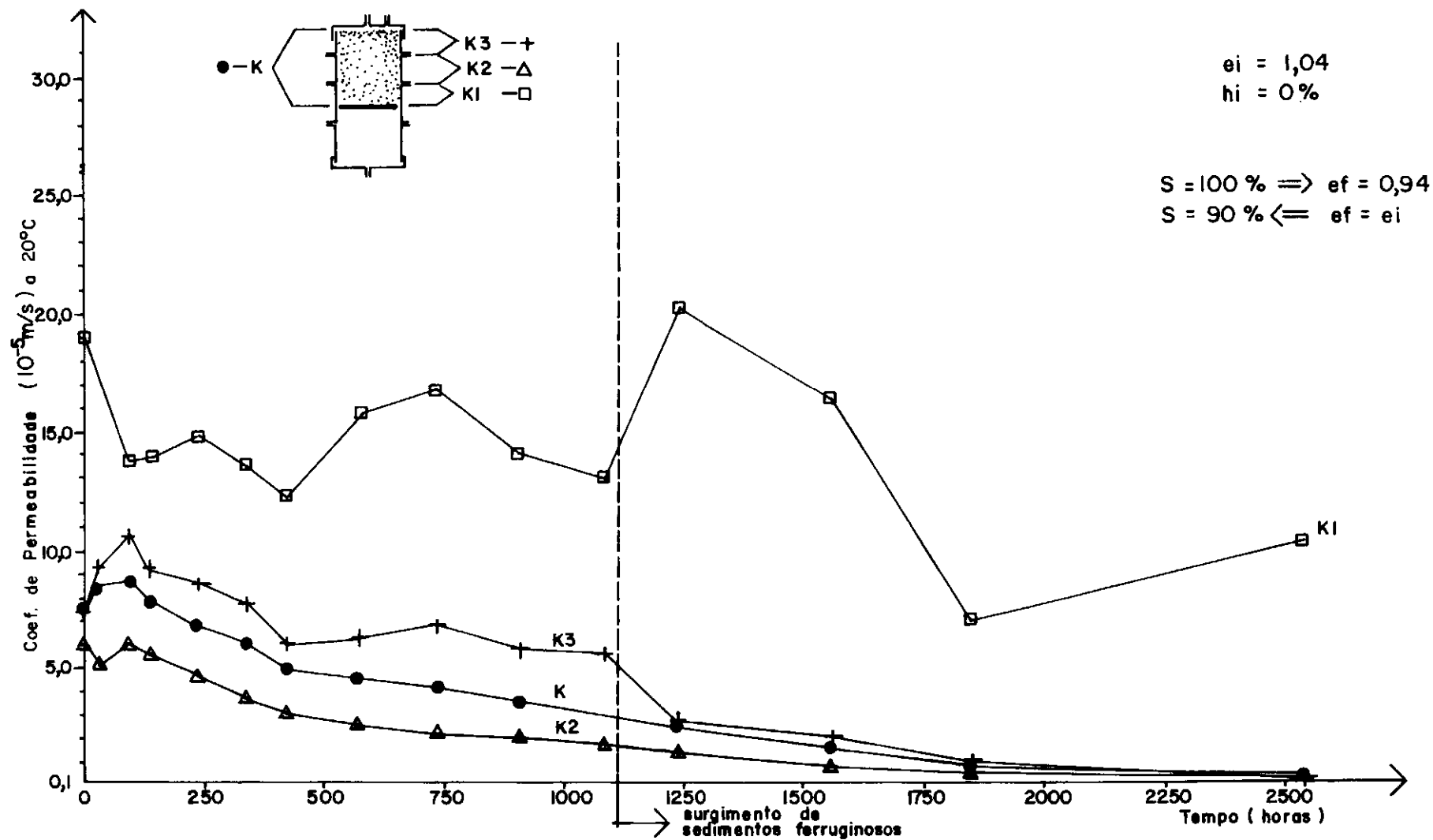


Figura IV.15 P-3 com Solo do Arenito Caiuã e o Bidim OP-20

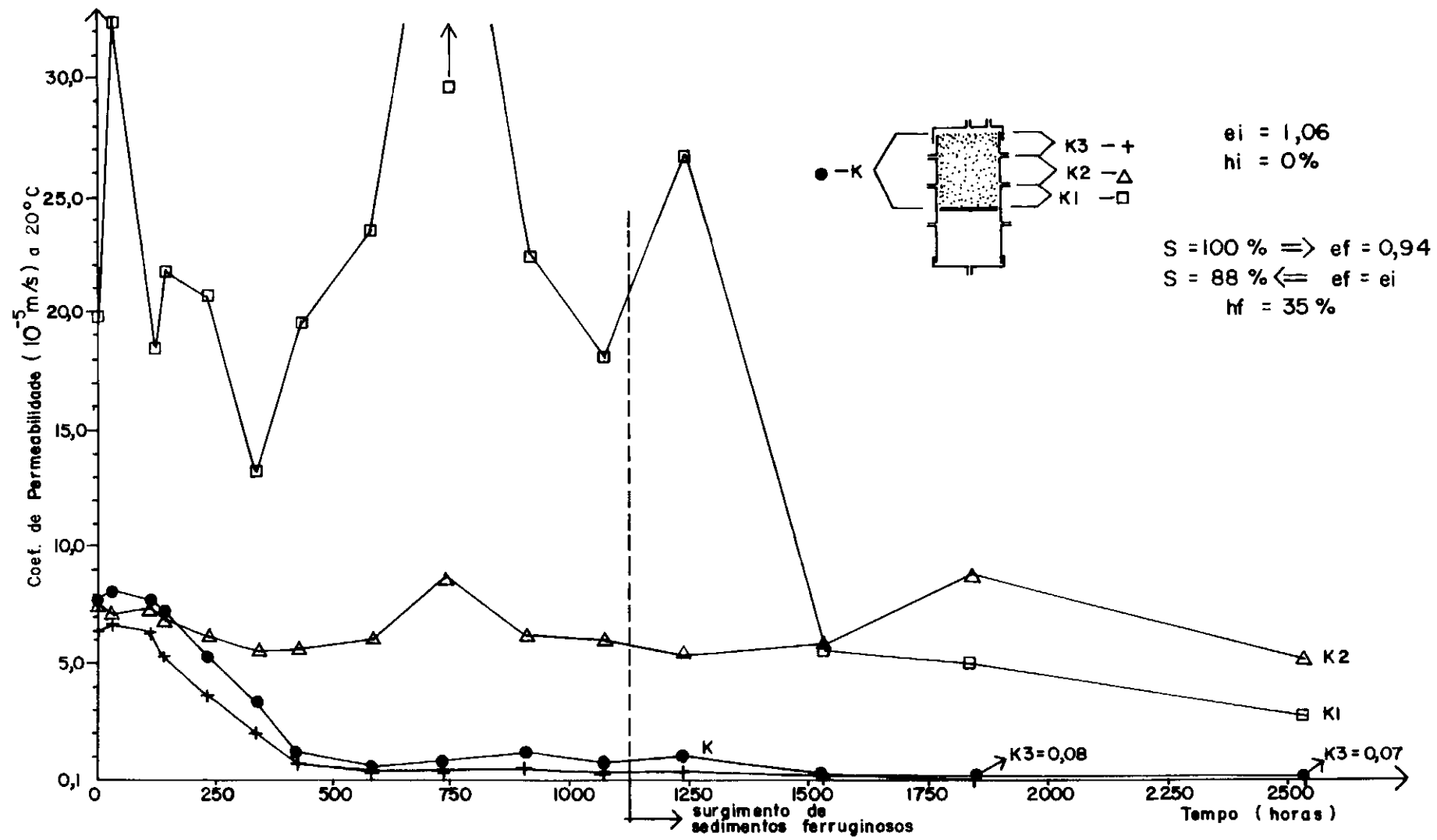


Figura IV.16 P-7 com Solo do Arenito Caiuã e o Bidim OP-20

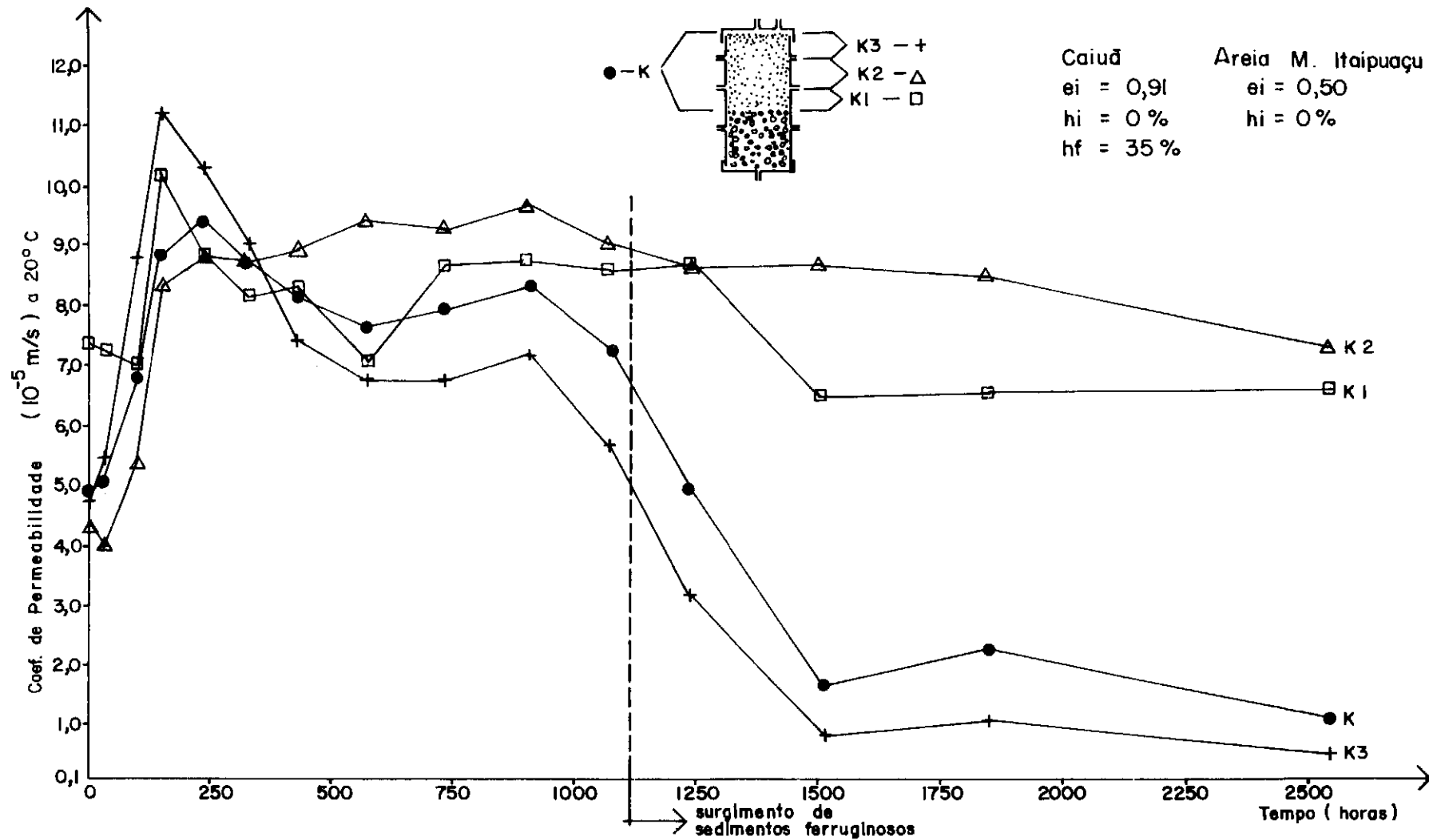


Figura IV.17 P-4 com Solo do Arenito Caiuã e Areia Média de Itaipuaçu

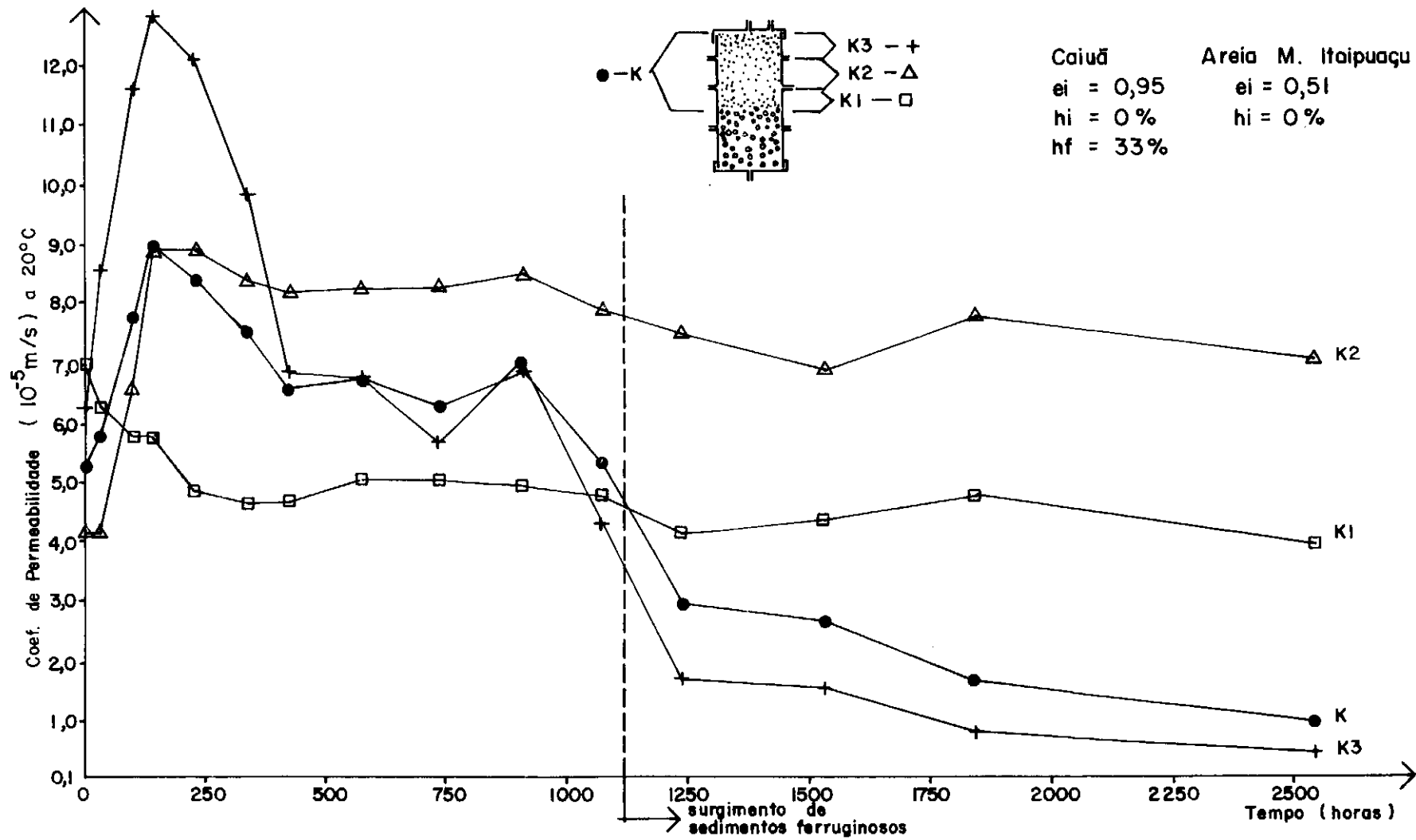


Figura IV.18 P-8 com Solo do Arenito Caiuã e Areia Média de Itaipuaçu

os ensaios P-1 e P-2, a partir de 260 horas, só levou-se em conta os piezômetros B (ensaio P-1) e E (ensaio P-2) desconsiderando-se o outro piezômetro correspondente do nível. Isto porque, a elevação do nível d'água em E (ensaio P-1) e em B (ensaio P-2) foi acima do que poderia ser considerado razoável, indicando provavelmente a presença de caminho preferencial para água entre E e D (ensaio P-1) e B e A (ensaio P-2). Para os demais ensaios, os cálculos da permeabilidade foram feitos considerando as alturas piezométricas médias a cada nível (A e D, B e E, C e F).

Nas figuras IV.11 a IV.18 apresentam-se também:

- o índice de vazios inicial da amostra de solo, e_i ;
 - a umidade inicial e final da amostra de solo, h_i e h_f .
- Porém, não se pode precisar o valor do índice de vazios final da amostra de solo, e_f , devido a presença dos sedimentos no topo do solo, que mascararam o volume de solo ao final do ensaio. No entanto, tem-se uma ordem de grandeza de e_f a partir de duas hipóteses extremas: (1ª) considerando o solo totalmente saturado e calculando e_f a partir da umidade final; (2ª) considerando nula a variação do índice de vazios, $e_f = e_i$.

Expõem-se, a seguir, os valores máximos de GR ("Gradient Ratio") verificados ao longo dos ensaios de filtração. Recordando que GR é a relação i_1/i_2 , onde i_1 e i_2 são os gradientes hidráulicos utilizados para o cálculo de K_1 e K_2 . A razão entre esses dois gradientes é capaz de indicar uma possível alteração da permeabilidade do solo, oriunda de um processo de colmatção nas proximidades do filtro.

Permeâmetro	P-1	P-2	P-3	P-4
Filtro	Typar 3267	Propex 4004	Bidia OP-20	A.M.Itaip.
Gr.máx.	1,88	1,08	0,40	1,35

Permeâmetro	P-5	P-6	P-7	P-8
Filtro	Typar 3267	Propex 4004	Bidia OP-20	A.M.Itaip.
Gr.máx.	1,0	0,76	1,76(*)	1,81

(*) valor obtido a partir de perda de carga hidráulica muito pequena, fora da precisão do ensaio.

A qualidade da água dos ensaios foi monitorada por intermédio de verificação do pH, da condutância elétrica específica e da turbidez. As amostras de água foram colhidas durante as leituras dos ensaios de filtração. Os locais de coleta d'água situaram-se antes dos permeâmetros, nos potes de entrada, e na saída depois dos permeâmetros. Os valores de pH e condutância elétrica específica, em termos gerais, apresentaram tendência de crescimento ao longo do ensaio para as águas colhidas na saída dos permeâmetros e valores estáveis para as águas colhidas nos potes de entrada, conforme a seguir.

CONTROLE DA ÁGUA	S A Í D A								ENTRADA
	P-1		P-2		P-3		P-4		POTE
	INÍCIO	FINAL	INÍCIO	FINAL	INÍCIO	FINAL	INÍCIO	FINAL	(P-1 a P-4)
pH	5,3	6,6	5,7	6,5	5,9	6,5	5,8	6,8	6,7
CONDUTÂNCIA ELET.ESPECÍFICA (MICROSIEMS/CN)	70	107	73	110	73	86	71	89	90

CONTROLE DA ÁGUA	S A Í D A								ENTRADA
	P-1		P-2		P-3		P-4		POTE
	INÍCIO	FINAL	INÍCIO	FINAL	INÍCIO	FINAL	INÍCIO	FINAL	(P-1 a P-4)
pH	6,1	6,6	6,5	6,7	6,5	6,7	6,3	6,4	6,7
CONDUTÂNCIA ELET.ESPECÍFICA (MICROSIEMS/CN)	73	92	79	101	81	114	75	83	90

Nota: P-1 e P-5 (Typar 3267); P-2 e P-6 (Propex 4004); P-3 e P-7 (Bidim OP-20); P-4 e P-8 (Areia Média de Itaipuaçu).

Os resultados de turbidez da água são apresentados nas tabelas IV.2 E IV.3. Com base nos ensaios de turbidez da água e na correlação FTU versus massa de partículas em suspensão, apresentada na figura IV.3, estabeleceram-se as curvas apresentadas nas figuras IV.19 E IV.20, visando quantificar e qualificar o processo de migração de partículas durante os ensaios de filtração realizados. Estas curvas relacionam a razão P/V contra o tempo e P contra V , respectivamente. Sendo P o peso de partículas de solo carregadas acumulado, dividido pelo peso inicial do solo, e V o volume de água percolado acumulado dividido pelo volume de vazios inicial do solo.

Tempo (h)	P-1 (Typar 3267)	Tempo (h)	P-2 (Propex 4004)	Tempo (h)	P-3 (Bidim OP 20)	Tempo (h)	P-4 (A. M. Itaip)	Tempo (h)	Pote de Entrada (P-1 a P-4)
0,00	0,15	0,00	0,33	0,00	0,48	0,00	0,17	0,00	0,20
28,58	0,54	20,67	0,16	28,42	2,00	28,58	0,82	28,42	0,25
99,17	3,90	49,25	0,75	98,92	3,50	98,83	2,70	98,92	0,30
143,42	4,40	119,67	2,70	142,08	2,10	142,08	1,90	142,08	0,30
238,17	2,80	162,92	4,50	238,42	1,70	238,50	1,60	238,42	0,24
334,50	1,80	259,25	2,20	334,42	1,40	334,67	0,80	334,42	0,36
430,92	3,20	355,17	1,60	430,58	2,40	430,67	1,00	430,58	0,26
574,92	3,10	451,33	2,60	574,75	1,10	574,75	0,56	574,75	0,33
741,83	1,60	595,42	1,70	741,42	0,73	741,42	0,39	741,42	0,16
910,17	1,30	762,25	1,00	910,08	0,67	909,42	0,45	910,08	0,07
1078,50	2,70	930,83	0,90	1078,33	1,52	1078,33	0,29	1078,33	0,20
1247,50	1,60	1099,00	0,94	1247,33	0,59	1247,42	0,57	1247,33	0,30
1558,92	1,50	1268,00	0,90	1558,33	0,73	1558,92	0,96	1558,33	0,45
1849,17	1,30	1579,58	1,00	1849,33	0,45	1849,42	0,38	1849,33	0,90
2545,62	1,45	1870,08	1,00	2546,92	1,10	2547,05	0,44	2546,92	0,46
		2566,87	2,30						

Nota : a turbidez está em FTU (fator de turbidez universal)

Tabela IV.2 Resultados de Turbidez da Água do Pote de Entrada, que Alimenta P-1 a P-4, e das Águas de Saída de P-1 a P-4

Tempo (h)	P-5 (Typar 3267)	Tempo (h)	P-6 (Propex 4004)	Tempo (h)	P-7 (Bidim OP 20)	Tempo (h)	P-8 (A. M. Itaip)	Tempo (h)	Pote de Entrada (P-5 a P-8)
0,00	0,38	0,00	0,71	0,00	1,00	0,00	0,39	0,00	0,30
26,92	0,83	22,25	1,00	26,75	1,70	26,92	2,00	22,25	0,22
97,25	2,00	49,17	1,70	122,08	1,80	97,00	2,60	49,17	0,26
140,50	2,20	119,42	2,30	140,58	1,90	140,75	1,70	119,42	0,32
236,83	2,10	162,75	1,90	236,75	2,60	236,83	1,60	162,75	0,33
336,50	0,90	259,00	3,50	336,42	1,70	336,33	0,80	259,00	0,34
429,08	1,50	358,58	2,60	429,17	6,50	429,25	1,00	358,58	0,32
573,17	0,85	451,17	4,20	575,25	7,00	575,25	0,64	451,17	0,34
739,75	1,30	597,00	3,60	739,58	4,70	739,50	0,45	597,00	0,18
908,67	0,64	761,92	0,86	908,50	1,20	908,58	0,46	761,92	0,10
1076,83	0,46	930,83	0,81	1076,75	1,90	1076,83	0,34	930,83	0,23
1245,75	0,51	1099,08	1,20	1245,67	1,60	1245,75	0,60	1099,08	0,28
1535,33	0,74	1267,92	1,70	1534,00	1,40	1533,08	0,99	1267,92	0,44
1845,83	0,43	1556,92	1,30	1848,17	0,85	1846,42	0,47	1556,92	0,80
2542,05	1,60	1868,17	0,53	2540,03	1,20	2542,70	0,54	1868,17	0,40
		2564,83	0,89					2564,83	0,45

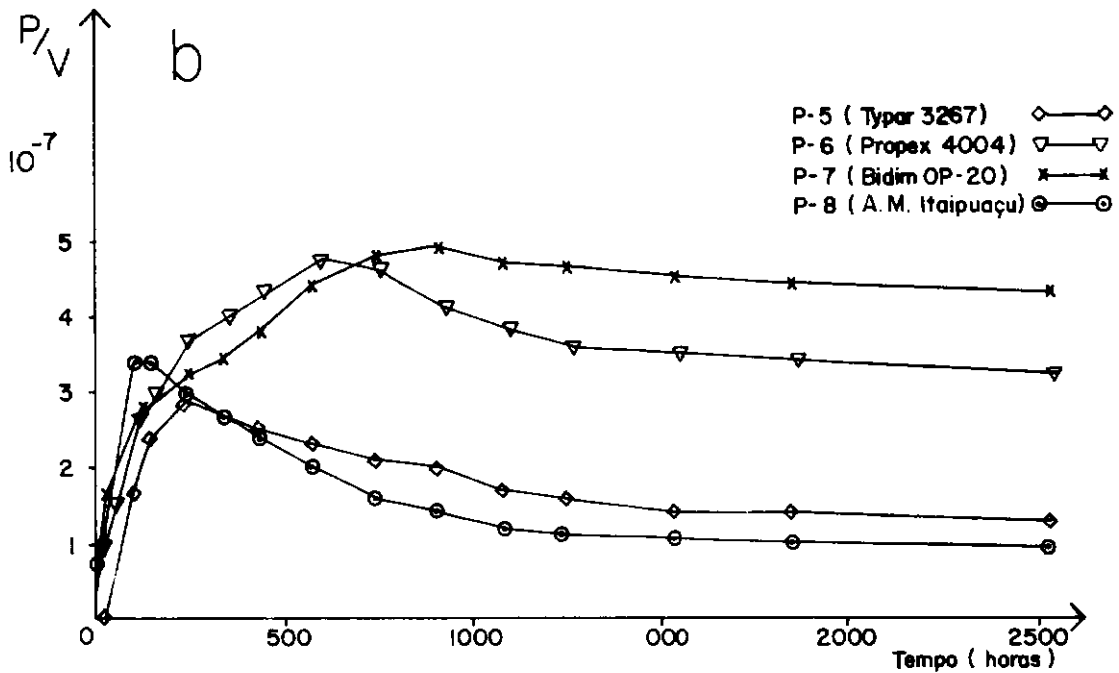
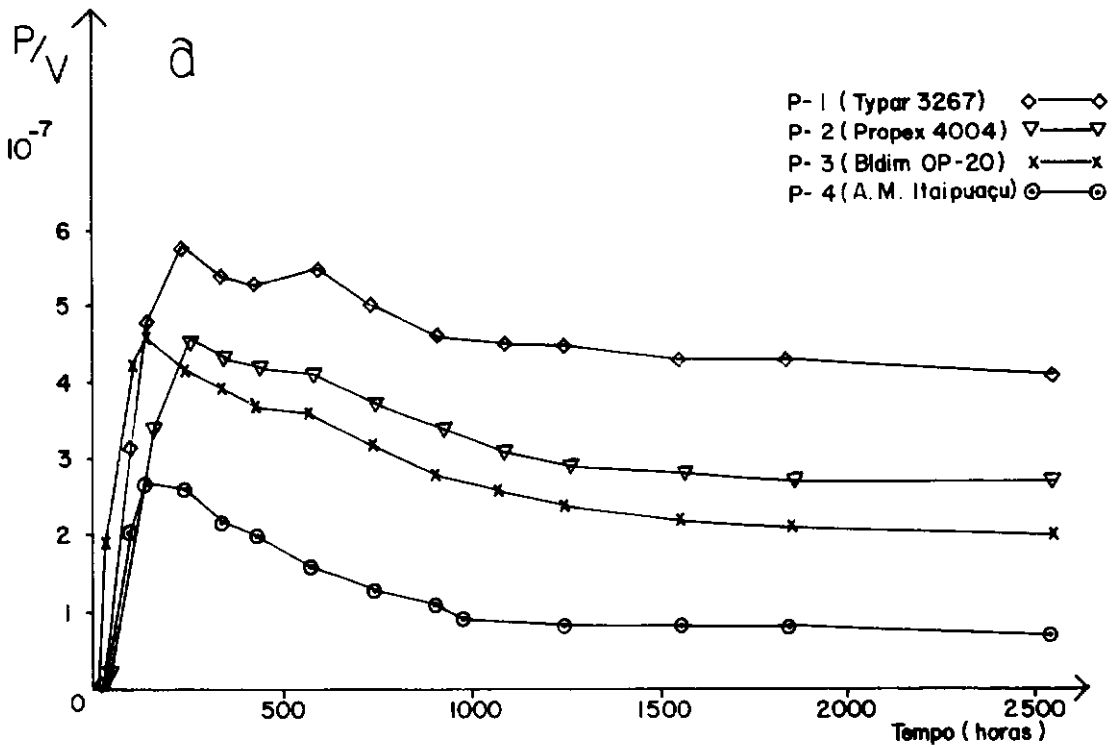
Nota : a turbidez está em FTU (fator de turbidez universal)

Tabela IV.3 Resultados de Turbidez da Água do Pote de Entrada, que Alimenta P-5 a P-8, e das Águas de Saída de P-5 a P-8

Ensaio de granulometria com sedimentação realizados em amostras de solo coletadas a diferentes alturas no corpo de prova, após os ensaios de filtração, figura IV.21, demonstraram que os solos mantiveram-se homogêneos e com sua granulometria inicial. A intenção destes ensaios foi verificar a possibilidade de ocorrência de migração de finos, no interior da amostra de solo percolada, que pudesse explicar a variação na permeabilidade.

Em função do surgimento dos sedimentos ferruginosos nos potes de entrada, e, no interior dos permeâmetros, realizaram-se, em duas ocasiões, coletas de amostras d'água percolada na saída de todos os permeâmetros, para análise bacteriológica. Estas análises não revelaram traço de contaminação bacteriológica. As amostras d'água pesquisadas estavam dentro do padrão de potabilidade. A análise química da água, que alimenta os ensaios de filtração, não revelou a presença do ferro em solução (precisão do teste igual a 5×10^{-4} g de ferro).

A análise biológica efetivada no sedimento ferruginoso, colhido no fundo do pote de entrada (P-5 a P-8), indicou a presença de microorganismos. O exame detectou algumas poucas algas e fungos, e muitas bactérias ferruginosas. Análise química qualitativa deste sedimento indicou a presença de ferro e argila. Verificou-se, também, que a saída do filtro de tratamento de água para os permeâmetros tinha formado vestígios de limo.



$P = \frac{\text{peso de partículas de solo carregadas acumulado}}{\text{peso inicial do solo}}$

$V = \frac{\text{volume de água percolado acumulado}}{\text{volume de vazios inicial do solo}}$

Figura IV. 19 A Relação P/V versus Tempo para os Ensaios P-1 a P-4(a) e P-5 a P-8(b)

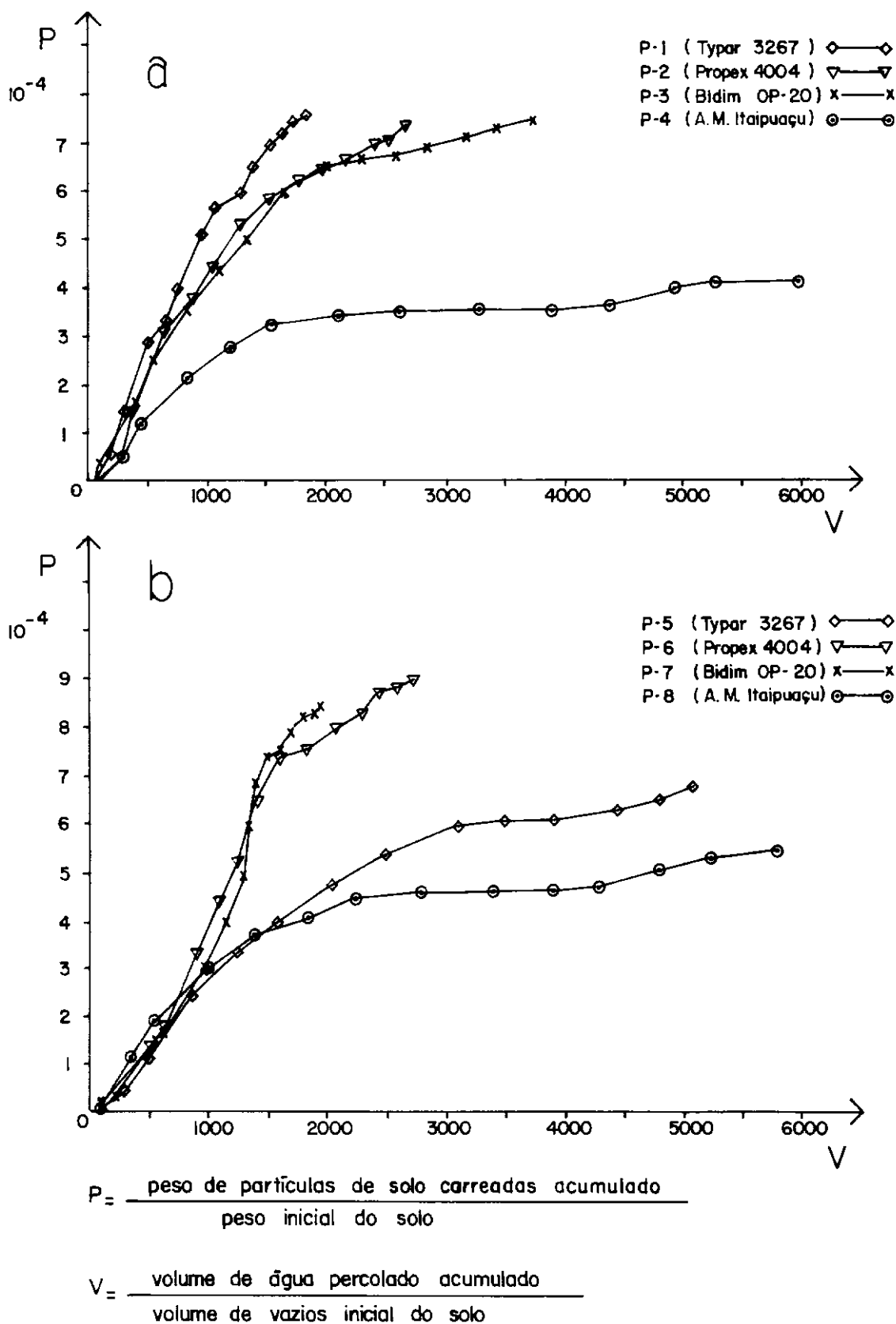
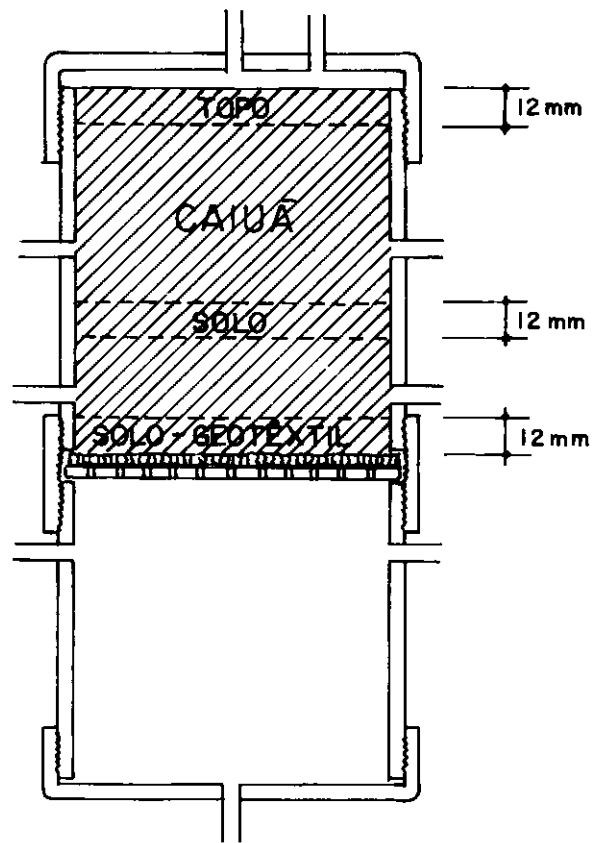
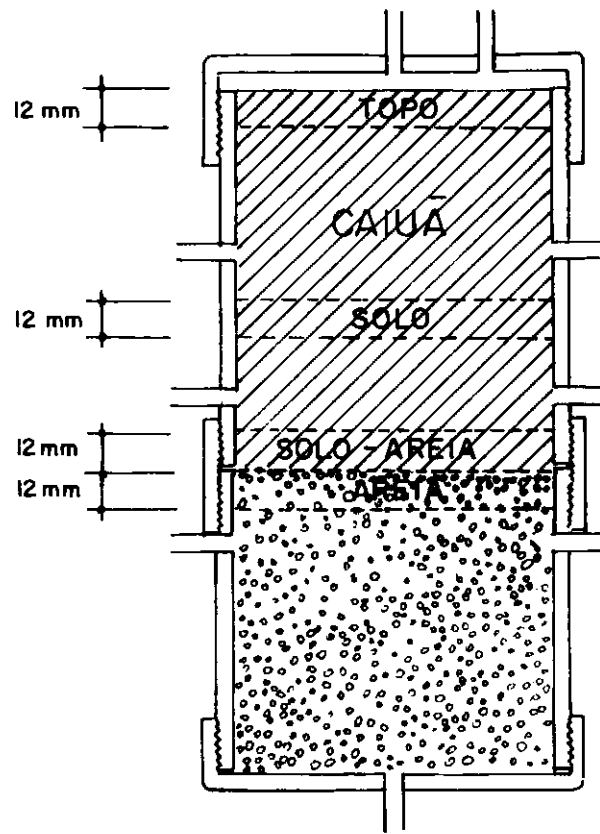


Figura IV.20 A Relação P versus V para os Ensaio P-1 a P-4(a) e P-5 a P-8(b)



P-1 a P-3 e P-5 a P-7



P-4 e P-8

Figura IV.21 Disposição das Fatias de Solo e Areia Coletadas ao Final dos Ensaios de Filtração (P-1 a P-8).

IV.5.3.3 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

De forma geral, as curvas permeabilidade versus tempo mostram que a fase principal de expulsão de ar, remanescente de uma saturação incompleta das amostras de solo, ocorreu de 0 a 100 horas ensaio. O ar deslocado pelo fluxo d'água tende a subir e sair pelos piezômetros o que libera mais canais para o fluxo, e, conseqüentemente, leva a um aumento na permeabilidade. Após as 100 horas de ensaio, observa-se uma tendência geral de declínio nas permeabilidades. Segue-se a esta fase uma tendência à estabilidade.

Em alguns ensaios, os valores calculados para o coeficiente de permeabilidade foram afetados por imprecisões na determinação da perda de carga hidráulica. Os valores da perda de carga hidráulica, a partir de determinado momento (1559 horas, 1099 horas, 259 horas, 337 horas para respectivamente os ensaios P-1, P-2, P-3 e P-7), tornaram-se muito pequenos. Este fenômeno afetou especificamente o valor da permeabilidade K_1 nos ensaios P-2, P-3 e P-7, e k_3 no ensaio P-1, lembrando-se que o gradiente externo foi mantido constante durante os ensaios. A explicação para o que ocorreu nos ensaios P-2, P-3 e P-7 pode estar ligada ao maior valor da permeabilidade junto a geotêxtil (K_1) função do transporte de partículas. Sendo que a situação de P-7 foi agravada pela verificação de uma concentração de perda de carga no topo da amostra, desde o início do ensaio traduzida nos baixos valores obtidos de K_3 . Valores baixos de K_3 , desde o início do ensaio, também foram registrados em

P-6, não se tendo uma explicação clara para este tipo de ocorrência.

O acúmulo de sedimentos ferruginosos no topo das amostras de solo a partir de 1125 horas acarretou a diminuição da permeabilidade K3 no topo do corpo de prova e, conseqüentemente, na permeabilidade média K de todos os ensaios, a menos de P-7 onde não se nota esta influência.

Após alcançar a fase de estabilidade, nos ensaios com filtros geotêxteis, os valores de K1, permeabilidade do solo sob influência do geotêxtil, mantiveram-se acima de K2, permeabilidade do solo propriamente dito. Já nos ensaios de filtro natural (P-4 e P-8) K1 mostra-se abaixo de K2, porém a diferença é muito pequena. O comportamento descrito demonstra uma boa performance na capacidade de drenagens dos filtros utilizados.

Quanto à retenção de partículas, os filtros ensaiados também revelaram-se eficientes. É o que se constata na figura IV.19, considerando que a razão P/V reflete o total de partículas que passa pelo filtro. P/V cresce no início dos ensaios até um valor máximo para, a seguir, tornar-se decrescente e depois estabilizar-se, isto é, a fase principal de transporte de partículas, através do filtro, dá-se na fase inicial do ensaio (até 200 horas). Este resultado é concordante com a idéia existente de rearranjo de partículas do solo junto ao geotêxtil no começo da filtração. Na figura IV.20 observa-se que a quantidade de partículas carregadas foi extremamente pequena em geral, e que a capacidade de retenção de partículas nos ensaios P-4 e P-8 (filtro natural) foi maior. Os resultados dos ensaios granulométricos, realizados em amostras do solo após os en-

saos de filtração, assinalaram que não houve mudança granulométrica. Tais resultados confirmam que, o transporte de partículas pelo fluxo d'água foi mínimo.

Não se verificaram nos diferentes pares de ensaios de filtração realizados, repetibilidade de resultados, quer quanto à permeabilidade quer quanto à quantidade de partículas carregadas, quando o enfoque é em termos de valores absolutos. No entanto, os resultados mantêm todos uma mesma ordem de grandeza.

Visando a avaliação das performances dos filtros geotêxteis nos ensaios realizados, compararam-se seus desempenhos com os alcançados nos ensaios com filtro natural (ensaio P-4 e P-8). No quadro a seguir, apresentam-se valores que podem ser considerados representativos para K_1 .

Permeâmetro	P-1	P-2	P-3	P-4
Filtro	Tygar 3267	Propex 4004	Bidia OP-20	Areia Itaip.
$K_1 (10^{-9} \text{ m/s})$	1,0	8,5	14,0	7,5

Permeâmetro	P-5	P-6	P-7	P-8
Filtro	Tygar 3267	Propex 4004	Bidia OP-20	Areia Itaip.
$K_1 (10^{-9} \text{ m/s})$	6,0	9,0	20,0	4,5

Pode-se constatar que os valores de K_1 , nos ensaios com filtros geotêxteis, são próximos aos obtidos nos ensaios com filtros de areia. Também verifica-se situação semelhante quando se compara o carregamento de partículas, figuras IV.19 E IV.20, onde a migração de partículas foi um

pouco maior nos filtros geotêxteis, porém da mesma ordem de grandeza da atingida nos filtros de areia.

A aplicação dos critérios de projeto de filtro de geotêxtil para o programa 3 fornece as seguintes informações, quanto a:

- capacidade de retenção - a tabela IV.4 resume os dados obtidos, sabendo-se que, em cada critério foram utilizados os valores de abertura de filtração disponíveis e indicados no item IV.3.1;
- permeabilidade - os filtros geotêxteis utilizados passam em todos os critérios apresentados no item II.7.2;
- colmatagem - todos os geotêxteis atenderam, nos ensaios, ao critério do FHWA que recomenda $GR < 3$ para aplicações severas.

Discutindo-se a retenção, o único critério que concorda integralmente com os resultados de ensaios é o proposto em conjunto pela Universidade de Grenoble e pela Escola Politécnica de Montreal (IRIGM/EPM). Sendo que, o critério proposto por MLYNAREK (1985) foi adequado para todos os ensaios, a menos dos ensaios com o Propex 4004, no qual afasta-se um pouco. Já o critério do Comitê Francês de Geotêxteis e Geomembranas (CFGG) distancia-se inteiramente dos resultados obtidos. Os demais critérios não coincidem com os ensaios realizados, pelo menos em dois dos três geotêxteis estudados.

A diminuição do pH da água na saída dos permeâmetros, no início dos ensaios de filtração, explica-se da seguinte forma: a água ao passar pelo solo, recebe ions H^+ provenientes do mesmo, o que faz aumentar sua quantidade de hidrogênio, tornando-a mais ácida. Com a continuação do

Origem	Critério	Typar 3267	Propex 4004	Bidim OP-20
CFGG	$FOS < C1.C2.C3.C4.d_{85}$	$250 < 122(NP)$	$400 < 122(NP)$	$130 < 122(NP)$
FHWA	$AOS \leq B d_{85}$	$250 \leq 190(NP)$	$400 \leq 190(NP)$	$130 \leq 190(P)$
IRIGM/EPM	$FOS < 1,5 d_{85}$	$250 < 435(P)$	$400 < 435(P)$	$130 < 435(P)$
GIROUD	$AOS < CU^{1,0,3} d_{85}$	$250 < 230(NP)$	$400 < 230(NP)$	$130 < 230(P)$
CÓDIGO ALEMAO	$D_w < d_{90}$	$240 < 200(NP)$	$400 < 200(NP)$	$130 < 200(P)$
MLYNAREK	$2 d_{15} < AOS < 2 d_{85}$	$2 < 250 < 380$ (P)	$2 < 400 < 380$ (NP)	$2 < 130 < 380$ (P)

NOTA : - P = passa , NP = não passa

- os números nas expressões estão em micra.

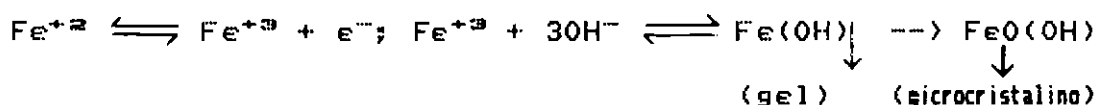
- o valor de d_{15} foi considerado igual ao de d_{20} .

Tabela IV.4 Critérios de Capacidade de Retenção Aplicados ao Programa 3

ensaio, o hidrogênio disponível no solo esgota-se e o pH da água na saída dos permeâmetros fica igual ao da entrada.

No tocante à variação da condutância elétrica específica, pode ter acontecido fato análogo ao ocorrido com o pH. Quando do contato inicial da água de percolação com o solo, o valor da condutância elétrica específica cai de 90 para 70 microsiems/cm devido ao ajuste físico-químico a nova situação (troca catiônica, absorção, reação química). Com o passar do tempo, o equilíbrio físico-químico é estabelecido e o valor da condutância elétrica da água na saída dos permeâmetros tende para o mesmo da água de entrada.

A precipitação ferruginosa nos potes de entrada do equipamento de ensaio é um fenômeno comum. As condições de ocorrência são boa aeração e ferro em solução, sob a forma iônica, e/ou em suspensão, sob a forma coloidal. O pote de entrada configura uma interface água/ar, que garante a boa aeração, formando um ambiente oxidante. A análise química não detectou a presença do ferro em solução na água de alimentação, provavelmente porque a quantidade de ferro em solução é muito diminuta, fora da sensibilidade do ensaio. Entretanto, visto o grande volume de água percolado, transcorrido 45% do tempo do teste, acumulou-se ferro em quantidade suficiente para formar um sedimento. O precipitado é composto de hidróxido de ferro amorfo, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, que com o tempo cristaliza em $\text{FeO}(\text{OH})$, mais argila. O ferro, quando precipita, enseja a deposição da argila, que está sob a forma coloidal, tanto por arraste mecânico quanto por neutralização de cargas. Indicam-se, a seguir, as reações químicas que se desencadeiam neste processo da oxidação do ferro:



A velocidade do fenômeno descrito pode ser incrementada pela presença de bactérias ferruginosas, cujas presenças foram confirmadas na água do ensaio que continha sedimento ferruginoso.

IV.6 - COMENTÁRIOS

A eficiência do equipamento de filtração foi comprovada no programa 1, considerando:

- a constatação da insignificância do fluxo d'água junto às paredes do permeâmetro;
- o fato do valor de permeabilidade encontrado, para a areia de São Francisco, estar dentro do esperado.

A experiência acumulada, ao longo da realização dos programas de ensaio de filtração, possibilitou também alguns aprimoramentos, no equipamento de filtração original, assim como, na sistemática de ensaio. Como principais aprimoramentos destacam-se:

- proteção das tomadas d'água dos piezômetros com tela;
- uma alimentação de água direta do pote de entrada para os permeâmetros;
- a introdução de um piezômetro no topo do permeâmetro;
- a aplicação da técnica de pluviação de amostras para solos com finos;
- o monitoramento da água de ensaio.

Os resultados dos ensaios de filtração mostraram

que:

- nos ensaios com a areia de S. Francisco, os valores de permeabilidade sofreram uma fase de instabilidade durante o período inicial. E nos ensaios com solo do arenito caiué e solo cenozóico, os valores da permeabilidade tiveram uma fase de crescimento no começo do ensaio. Para posteriormente, no caso da areia e dos solos, ser alcançada uma fase de estabilidade, quando ficou entendido que as variações da permeabilidade no período inicial do ensaio foram motivadas pela expulsão do ar;
- através da análise da água de saída, constatou-se que, nos ensaios de filtração com o solo caiué (programa 3), o carreamento de partículas coloidais ocorreu inicialmente de forma mais acentuada (total estimado de partículas carregadas em torno de 1g para uma massa total de amostra de aproximadamente 1400g), apesar de não ter sido possível detectar esta perda de material nos ensaios granulométricos realizados;
- o desempenho dos filtros geotêxteis empregados foi bom tanto no que se refere à capacidade de drenagem da água como na filtração das partículas;
- os resultados dos pares de ensaios realizados mantiveram-se dentro de uma mesma ordem de grandeza.

A comparação dos resultados dos ensaios de filtração com critérios de retenção apresentados na bibliografia permitiu concluir que:

- o critério da IRIGM/EPM foi o único a concordar com todos os resultados de ensaios;
- o critério de MLYNAREK (1985) exceto os ensaios com o Propex 4004 junto ao solo do arenito caiué concorda com o

resultado dos ensaios;

- o critério do CFGG foi o que mais afastou-se dos resultados de ensaios.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

V.1 - INTRODUÇÃO

O presente trabalho objetivou o estudo do comportamento de geotêxteis como elemento de filtro, marcadamente nos seguintes aspectos: capacidade de retenção de partículas; e colmatção física do geotêxtil. Para este fim, foram efetuados ensaios de filtração de longa duração em amostras permanentemente submersas para diferentes tipos de geotêxteis e solos. Foi desenvolvido um equipamento de filtração especificamente para esta pesquisa, do tipo coluna de filtração com câmara inferior baseado na metodologia do "Gradient Ratio" proposta por CALHOUN (1972).

O trabalho realizado envolveu a execução de 18 ensaios de filtração. Foram examinados três solos (uma areia e dois solos originários de rocha sedimentar), e cinco diferentes tipos de filtro, quais sejam, três diferentes geotêxteis (dois fabricados no país e um no exterior), um papel filtro e um filtro natural. Ao longo dos ensaios, retiraram-se amostras de água e monitoraram-se a vazão e a carga total de água em diferentes pontos no corpo de prova. Nas amostras de água foram feitos ensaios de pH, de condutância elétrica específica, de turbidez. Para cada ensaio, determinaram-se os índices de vazios inicial e final, da amostra de solo, e seu grau de saturação.

V.2 - CONCLUSÕES DA PESQUISA

As principais conclusões desta pesquisa, são:

- O equipamento desenvolvido demonstrou funcionar de maneira satisfatória.
- O desempenho dos filtros geotêxteis foi bom tanto no que se refere à capacidade de drenagem da água quanto à de retenção de partículas do solo.
- Os resultados dos ensaios com as mesmas condições iniciais mantiveram-se dentro de uma mesma ordem de grandeza.
- Constatou-se a opinião expressa por outros autores que os critérios de projeto de filtros de geotêxteis são conservadores. Somente um único critério, dos seis considerados, foi capaz de prever a boa performance de todos os geotêxteis nos diferentes ensaios efetuados nesta pesquisa. Este critério foi o formulado em conjunto pela Universidade de Grenoble e pela Escola Politécnica de Montreal. Um outro critério de capacidade de retenção que também revelou-se adequado foi o de MLYNAREK (1985). Este critério, com exceção dos ensaios efetuados com o Propex 4004 como elemento de filtro do solo proveniente do arenito caiuaú, concorda com os resultados obtidos por via experimental.
- Verificou-se a formação do pré-filtro nos ensaios de filtração com o solo caiuaú (programa 3). Chegou-se a esta constatação, indiretamente, através da análise da fração coloidal do solo na água de percolação.
- O ar remanescente da saturação incompleta do interior do permeâmetro exerce uma influência significativa nos valores medidos para a permeabilidade, na fase inicial do en-

saio.

V.3 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São apresentadas, a seguir, uma série de sugestões para continuidade desta linha de pesquisas.

- Prosseguir a execução de ensaios de filtração com diferentes tipos de solos e geotêxteis com intuito de formar um banco de dados que permita o estabelecimento de critérios de projeto de filtros geotêxteis mais realistas e econômicos. Estes estudos serão particularmente importantes para o caso de solos cujo comportamento à filtração é considerado crítico, tais como solos de graduação aberta e solos amplamente graduados, solos estes passíveis ao fenômeno conhecido como sufusão.
- Seria também de interesse investigar diferentes formas de preparo das amostras de solo para os ensaios de filtração, quais sejam.
 - . Amostras altamente saturadas posicionadas no interior do permeâmetro por derramamento. A elevada saturação inicial da amostra minimizaria a influência do ar na medição da permeabilidade no início do ensaio, o que permitiria o encurtamento do tempo do mesmo.
 - . Amostras indeformadas e compactadas, tomando-se os cuidados indicados no item III.3.1, para que as condições de ensaio fiquem mais próximas das encontradas no campo.
- Nos ensaios de filtração tentar medir a pressão piezométrica no interior da amostra de solo.
- Fazer ensaios de filtração com o permeâmetro invertido e

com fluxo ascendente. Esta condição é mais crítica e pode melhor representar certas situações de campo.

- Realização de ensaios de filtração em solos com geotêxteis visando estudo da colmatação físico-química. Para isto, a face do geotêxtil deve ser exposta ao ar, de forma contínua ou em ciclos, ao longo do ensaio.
- Determinação da abertura de filtração dos geotêxteis em uso no país através da metodologia do AOS e da percentagem de área aberta (PAA), no caso de geotêxteis tecidos.

APRIMORAMENTOS NO EQUIPAMENTO UTILIZADO NA PESQUISA E NA TÉCNICA DO ENSAIO

- Utilizar material transparente na confecção dos permeâmetros e potes de entrada e saída, de forma a permitir a visualização das partes internas do equipamento de filtração.
- Substituir a luva na ligação das câmaras superior e inferior por sistema de parafusos com vedação através de anel de borracha.
- Em ensaios de filtração de longa duração, dois procedimentos podem ser tentados para evitar a deposição de sedimentos ferruginosos durante os mesmos.
 - . Instalar um pote semelhante ao pote de entrada antes deste. O novo pote funcionaria como um "decantador", teria altura avantajada com o ponto de saída d'água bem acima do fundo, de forma a depositar na sua base o sedimento, que por ventura seja formado, liberando a água mais pura para o ensaio.
 - . Passar a água por uma coluna deionizadora com intuito de eliminar integralmente a presença de íons.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERTRAM G. E. (1940) "An experimental investigation of protective filter" Soil Mechanics Series, Nº 7, Publication Nº 267, Graduate School of Engineering, Harvard University, Cambridge, Mass., 1-21.
- BISHOP A. W., HENKEL D. J. (1962) "The Triaxial Test", Edward Arnold Ltd., London, 2ª edição.
- BYRNE B. J. (1989) "Evaluation of the ability of geotextile to prevent pumping of fines into ballast", M. Sc. thesis, University of Massachusetts at Amherst, U.S.A., 106.
- CALHOUN C. (1972) "Development of design criteria and acceptance specifications for plastic filter cloths", Technical report, S-72-7, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- CARROL R. G., Jr. (1985) "Hydraulic properties of geotextile" Proc. of the Symposium on Geotextile Testing and the Design Engineer, Los Angeles, U.S.A., ASTM special technical publication 952. 7-20.
- CHAMMAS R. (1988) "Critérios de dimensionamento de filtros com geotêxteis" Trabalho de Graduação, Divisão de Engenharia de Infra-estrutura Aeronáutica, ITA, São José dos Campos, 76.

- CHRISTOPHER B. R., HOLTZ R. D. (1985) "Geotextile engineering manual" FHWA, 980.
- DU PONT (U.K.) LIMITED, Typar (1989) "Guia de seleção" Leicester, England.
- FAURE Y., GOURG J. P., BROCHIER P., ROLLIN A. (1986) "Soil-geotextile interaction in filter systems" Proc. 3th Int. Conf. on Geotextile, Viena, Austria, 1207-1212.
- FERREIRA R. C. (1978) "Colmatação físico-química de filtros - Tentativa de Simulação" Anais 6º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Rio de Janeiro, Brasil, Vol.1, 81-100.
- FISCHER G. R., CHRISTOPHER B. R., HOLTZ R. D. (1990) "Filter criteria based on pore size distribution" Proc. 4th Int. Conf. on Geotextiles and Geomembranes, The Hague, The Netherland, 289-294.
- GIROUD J. P. (1982) "Filter criteria for geotextile" Proc. 4th Int. Conf. on Geotextile, Las Vegas, U.S.A., Vol.1, 103-108.
- GIROUD J. P. (1988) "Review of geotextile filter criteria" First Indian Geotextile Conference on Reinforced Soil and Geotextiles, Indian.

- GOURC J. P., FAURE Y. H. (1990) "The soil particle, the water and the fiber, a fruitful interaction now controlled ..." Proc 4th Int. Conf. on Geotextile, Geomembranes and Related Products, The Hague, The Netherlands, 1-23.
- HALIBURTON T. A., WOOD P. D. (1982) "Evaluation of the U. S. Army Corps of Engineer gradient ratio test for geotextile" Proc. 2th Int. Conf. on Geotextile, Las Vegas, U.S. A., 97-101.
- INGOLD T. S., MILLER K. S. (1988) "Geotextiles Handbook" Thomas Telford, London, 152.
- JOHN N. W. M. (1987) "Geotextiles", Blackie and Son Ltd. Glasgow and London, 347.
- KARPOFF K. P. (1955) "The use of laboratory tests to develop design criteria for protective filters" Proc. A.S.T.M., 55, 1183-1198.
- KENNEY T. C., LAU D. (1985) "Internal stability of granular filters" Can. Geotech. J., 22(1), 32-43.
- LAFLEUR J., MLYNAREK J., ROLLIN A. L. (1989) "Filtration of broadly graded cohesionless soils" Journal of Geotech. Engineering, Vol.115, No 12, 1747-1768.

- LAWSON C.R. (1990) "Geotextile filter performance with fine grained soils" Proc. 4th Int. Conf. on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, The Hague, The Netherlands, 301-306.
- MERWE C. J., HORAK E. (1989) "Evaluation of soil/geotextile compatibility" Proc. XIth Int. Conf. on Soil Mechanics and Engineering, Rio de Janeiro, Brasil.
- MLYNAREK J., LAVLEUR J., LEWANDOWKI J.B. (1990) "Field study on long term geotextile performance" Proc. 4th Int. Conf. on Geotextile and Related Products, The Hague, The Netherlands, 259-262.
- OLIVEIRA FO, W. L. (1987) "Considerações sobre ensaios triaxiais em areias" Tese M.Sc. COPPE-UFRJ, 265.
- PRAPAHARAN S., HOLTZ R. D., LUNA J. D. (1989) "Pore size distribution of nonwoven geotextile" Geotech. Testing J., ASTM, Vol.12, Nº4, 261-268.
- PROPEX DO BRASIL PRODUTOS SINTÉTICOS LTDA "Guia de Seleção" São Paulo, SP.
- QURESHI S., KOGLER R. M., BHATIA S. K. (1990) "Long term filtration behavior of nonwoven geotextiles" Proc. 4th Int. Conf. on Geotextile, Geomembranes and Related Products, The Hague, The Netherlands, 301-306.

- AMURADA LTDA. (1980) "Relatório Final da Ligação Ferroviária Celso Bueno-Araguari, Subtrecho A".
- RHODIA S.A. (Bidim) "Drenos, princípios básicos" São Paulo, SP, 64.
- RHODIA S.A. (Bidim) "Guia de seleção", São Paulo, SP.
- ROCHA A.P.F. (1983) "Geotêxteis matéria-prima" Exposição feita no Porto em 8 Nov., Portugal, 11.
- ROLLIN A.L., LAFLEUR J., MLYNAREK J., FAVRE Y., GOURC J.P. (1989) "Long Term behaviour of geotextile in drainage systems" Proc. XIIth Int. Conf. on Soil mechanics and Foundations Engineering, Rio de Janeiro, Brasil.
- ROLLIN A.L., LOMBARD G. (1988) "Mechanism affecting long-term filtration behavior of geotextiles" Geotextiles and Geomembranes 7, 119-145.
- RYCROFT D., JONES C.P.D. (1982) "Geotextile filtration performance e current filter criteria" Proc. 2th Int. Conf. on Geotextile, Las Vegas, U.S.A., 67-72.
- SATO M., YOSHIDA T., FUTAKI M. (1986) "Drainage performance of Geotextile" Geotextile and Geomembrane, Vol.4, Nº 34, 223-240.

- SHERARD J.L., DUNNIGAN L.P., TALBOT J.R. (1984) "Basic properties of sand and gravel filters" Journal of Geotech. Engineering, Vol.110, No 6, 684-718.
- SHERARD J.L., DUNNIGAN L.P. (1989) "Critical filters for impervious soils" Journal of Geotech. Engineering, Vol.115, No 7, 927-947.
- SILVEIRA A. (1963) "Algumas considerações sobre filtros de proteção", Tese apresentada a EPUSP, Brasil.
- U.S.C.E. (1941) "Laboratory investigation of filters for Enid and Grenada dams" Technical Memorandum No 183-1, U.S. Army, Waterway Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- U.S.C.E. (1953) "Filter experiments and design criteria" Technical Memorandum No 3-360, U.S. Army, Waterway Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- VAN ZANTEN R.V. (1986) "Geotextiles and geomembranes in civil engineering" John Wiley and Sons, New York/Toronto, 658.
- VIDAL D., RIGHETTI C. (1990) "Propriedades Hidráulicas dos Geotêxteis" 6º CBGE e IX COBRAMSEF, Vol.1, 589-594.
- WEI K.Y., VIGO T.L., GOSWAMI B.C., DUCKETT K.E. (1985) "Permeability of soil-geotextile systems" Textile Research Journal, October, 620-626.

- WILLIAMS N.D., ABOUZAKHM M.A. (1989) "Evaluation of geotextile/soil filtration characteristics using the hydraulic conductivity ratio analysis" *Geotextile and Geomembranes* 8, 1-26.

- WILLIAMS N.D., LUETTICH S.M. (1990) "Laboratory measurement of geotextile filtration characteristics" *Proc. 4th Int. Conf. on Geotextile, geomembranes and Related Products*. The Hague, The Netherlands, 273-278.